



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

经 典 系 列 · 2 1

核反应堆动力学基础

(第二版)

重排本

黄祖洽 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

经 典 系 列 · 2 1

核反应堆动力学基础

(第二版)

重排本

黄祖洽 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆动力学基础:重排本/黄祖洽编著. —2 版. —北京:北京大学出版社, 2014. 12

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25218-5

I. ①核… II. ①黄… III. ①反应堆动力学 IV. ①TL327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 283501 号

书 名: 核反应堆动力学基础(第二版)(重排本)

著作责任者: 黄祖洽 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-25218-5/TL · 0003

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子邮箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 29 印张 578 千字

2007 年 9 月第 1 版

2014 年 12 月第 2 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 80.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书第一版于1983年发行,从反应堆物理学的观点,系统地讨论了核反应堆动力学基础的各个方面,着重介绍有关问题的物理背景和分析问题所用的理论方法.在第一章提供了必要的中子物理基础知识和引进了点堆模型动态学方程之后,以下四章用这一模型讨论了反应性变换的各种情况和相应的功率响应、短期功率变动或长期运行所引起的反应性反馈效应,并给出了处理这些问题的理论分析和数值计算方法.第六和第七两章从中子输运方程和一般反应系统的运动论出发讨论了和空间有关的反应堆动力学.这两章中所发展的理论方法,对探讨各种反应系统动力学具有相当普遍的意义.

第二版在修订第一版中出现的若干误排和错漏的同时,新增了第八章,其中包含了对流体运动影响的再考虑和新近发展起来的晶格 Boltzmann 方法的简单介绍.

第二版前言

本书第一版 1983 年发行后已有 20 余年, 由于当初发行量偏少, 坊间早已售尽. 我国改革开放后, 经济高速发展, 能源需要大幅度增长. 现在, 核电站的建设已经成为解决能源需要的一个重要途径. 按照国家计划, 估计到 2020 年, 核电将上升到占总电力的 4%, 这意味着在未来 14 年中中国新增核发电量将达 3000 万千瓦左右. 换句话说, 将新建 30 座规模为 100 万千瓦的核电站. 显然, 这一严重任务要求有大量年轻人参加进来, 及时学习、掌握有关核反应堆的科学技术, 以便满足那么多核电站的研究、设计、建设、运行和管理对人才的需要. 本书作为与核能有关专业的教师、学生和从事堆物理工作及核动力学研究的科技工作者的基础性参考书, 仍然有相当价值. 北京大学出版社决定对它修订出第二版, 看来是正确、及时的, 也是值得感谢的.

趁此修订出第二版的机会, 作者对第一版内容和文字做了多处勘误和改动. 在新增的第八章里, 根据多年从事核反应堆理论工作的蔡少辉教授的建议和帮助(作者在此谨对这位多年的老友表示衷心的感谢), 用两节(§ 8.1 和 § 8.2)的篇幅对流体力学运动的影响进行了更详尽的再考虑; 而在随后的五节中则简单介绍了近年来新发展的, 一种有可能应用于中子输运理论的数值方法——晶格 Boltzmann 方法. 希望这一方法对于用更先进的电子计算机武装起来的新读者有帮助. 另一方面, 尽管 20 多年来, 核数据的测量和评价工作使基本核数据的精度有了提高, 市场上也出现了多种应用于核反应堆设计和计算的“软件包”, 本书第二版中却没有引入这些材料, 因为它们的引入将大大增加修订的工作量和成书的篇幅. 而且, 从编写本书的初衷——向特定对象介绍核反应堆动力学的物理基础和主要计算方法的原理——看来, 付出这些代价既不合适, 也没有必要.

虽然在第二版的修订和写作过程中, 尽力纠正了所发现的差错, 但限于作者的水平, 错漏之处仍在所难免. 希望读者发现后不吝指正!

黄祖洽

2006 年 12 月

第一版前言

核反应堆动力学的研究对象是核裂变链式反应堆的动态和动力行为. 它既要研究反应堆工作状态随时间变化的特点和产生这些特点的内在物理原因, 也要研究影响这些变化的其他因素和影响的规律. 研究的目的是使我们可以对堆运行中可能出现的现象(特别是事故)进行预测和分析, 为进一步探讨反应堆的最佳利用和控制问题提供必要的基础.

本书从反应堆物理学的观点, 系统地讨论了核反应堆动力学基础的各个方面, 着重介绍了有关问题的物理背景和分析问题所用的理论方法. 在第一章提供了必要的中子物理基础知识和引进了点堆模型动态学方程之后, 接下的四章用这模型讨论了反应性变化的各种情况和相应的功率响应、短期功率变动或长期运行所引起的反应性反馈效应, 并给出了处理这些问题的理论分析和数值计算方法. 第六和第七两章从中子输运方程和一般反应系统的运动论出发讨论了和空间有关的反应堆动力学. 这两章中所发展的理论方法, 对探讨各种反应系统动力学具有相当普遍的意义.

除作者本人的工作外, 本书写作时参考了 G. R. Keepin, D. L. Hetrick, 以及 A. Z. Akcasu, G. S. Lellouche 和 L. M. Shotkin 的有关著作, 同时也参考了到本书写作时为止的期刊文献. 所有文献均见各章末所附文献目录.

承许汉铭、马大园、田和春、张玉山等同志分别阅读本书各章的原稿, 热心地提出了使内容得到改进的有益意见. 作者对他们表示衷心感谢.

由于作者水平的限制, 书中的不妥和错误之处一定不少. 欢迎读者批评指正.

目 录

第一章 物理基础简介和简化反应堆动态学方程	1
§ 1.0 引言	1
§ 1.1 物理基础	3
§ 1.2 裂变中能量、质量和电荷的分布	4
§ 1.3 裂变中放出的瞬发中子和 γ 射线	8
§ 1.4 简化的反应堆动态学方程	14
§ 1.5 裂变中的缓发中子和它们的先行核	18
参考文献	30
第二章 固定和阶跃反应性、脉冲源和振荡源	32
§ 2.1 平衡态和临界性、无源模型	32
§ 2.2 反应性方程	35
§ 2.3 对阶跃反应性输入的响应	43
§ 2.4 矩形反应性脉冲	51
§ 2.5 与时间有关的源	55
§ 2.6 振荡源、频率响应和传递函数	62
§ 2.7 反应性小振荡	66
参考文献	74
第三章 一般点堆动态学	75
§ 3.1 求解点堆动态学初值问题的奇异扰动法	75
§ 3.2 线性反应性输入	91
§ 3.3 反应堆启动	98
§ 3.4 缓慢的反应性变化	112
§ 3.5 Akcasu 微扰解法、描述函数	118
§ 3.6 周期性脉冲装置的动态特征	124
参考文献	131
第四章 数值计算法和积分方程表示	133
§ 4.1 Gear 方法	133
§ 4.2 差分计算中的修匀和外推技巧	137
§ 4.3 积分方程形式和数值计算	146

§ 4.4	加权残差法	149
§ 4.5	Hansen 方法	150
§ 4.6	数值检验例	152
§ 4.7	Hermite 插值多项式法	157
§ 4.8	Keepin 积分方程	162
§ 4.9	反应堆动态分析的逆方法	167
参考文献		176
第五章 反应性反馈、自限堆功率漂移及堆的中期和长期行为		177
§ 5.1	反应性温度系数	177
§ 5.2	反应性反馈的数学模型, 反馈核	185
§ 5.3	Nordheim-Fuchs 模型	190
§ 5.4	小反应性漂移	197
§ 5.5	瞬发临界附近的漂移	205
§ 5.6	Fuchs 斜坡输入模型	214
§ 5.7	复杂停堆机制, 热堆	223
§ 5.8	复杂停堆机制, 快堆	232
§ 5.9	氙反馈和其他裂变产物积累的影响	238
§ 5.10	燃耗和转换	247
参考文献		254
第六章 与空间有关的动力学		257
§ 6.0	引言	257
§ 6.1	中子输运方程	258
§ 6.2	介质原子核运动的影响	266
§ 6.3	流体力学运动对中子输运的影响	285
§ 6.4	流体力学方程组和热工水力问题	295
§ 6.5	多群扩散近似	301
§ 6.6	与空间和能谱有关的中子学现象	309
§ 6.7	数值计算方法	314
§ 6.8	因子分解法(准静态法)	323
§ 6.9	模项展开法(综合法)	329
§ 6.10	粗网格少群近似法和节点法	338
§ 6.11	有限元法	342
参考文献		348

第七章 与空间有关的动力学中的若干问题	352
§ 7.1 温度反馈	352
§ 7.2 和空间有关的氙反馈, 氙致功率振荡	363
§ 7.3 与空间有关的燃耗问题	372
§ 7.4 脉冲源	379
§ 7.5 中子波	386
§ 7.6 反应堆噪声	390
参考文献	404
第八章 流体运动影响的再考虑和晶格 Boltzmann 方法的简介	407
§ 8.1 流体运动影响的再考虑	407
§ 8.2 一维球对称系统	410
§ 8.3 晶格 Boltzmann 方法的提出	421
§ 8.4 晶格气体元胞自动机	423
§ 8.5 晶格 Boltzmann 方程	429
§ 8.6 从晶格 Boltzmann 方程到 Navier-Stokes 方程	433
§ 8.7 边界条件	437
参考文献	440
索 引	442

第一章 物理基础简介和简化反应堆动态学方程

§ 1.0 引言

世界进入了原子能时代,原子能在人类利用的能源中地位越来越重要.随着各种类型的反应堆在世界各国的大量兴建和运转,出现了大量的动力学问题需要解决.核反应堆动力学就是适应这一需要而迅速发展起来的一门新的工程物理科学.

核反应堆动力学的研究对象是原子核裂变链式反应堆的动态和动力学行为.它既要研究反应堆状态随时间变化的特点和它们产生的内在物理原因,也要研究影响这些变化的各种因素和规律,从而探讨决定各种反应堆工作稳定性的条件和控制的途径,并对反应堆运行中可能出现的事故及其后果进行预测和分析.

反应堆状态随时间的变化表现为堆中种种物理量在给定条件下随时间的变化.例如,反应堆中中子的数量和分布以及相应的反应堆功率的大小和分布随时间的变化.在反应堆的启动、运转、事故和停堆过程中,这些变化都具有哪些特点?受哪些条件的制约?可以如何调节?反应堆中各种材料的组成和状态是怎样随着这些变化而变动的?这些变动反过来又如何影响反应堆的工作?如此等等.这些问题都是我们希望在反应堆动力学中加以探讨的.

产生反应堆中所有这些变动和动力学行为的根本内在物理原因,是堆内中子在输运过程中跟堆中各种材料的原子核所进行的各种微观相互作用,即各种核反应.这些核反应中最关键的是中子和核燃料原子核作用所引起的核裂变反应.众所周知,核裂变反应不仅提供了核能,而且提供了使增殖中子的裂变链式反应能维持下去的若干次级中子.中子和核能是反应堆运转中的主要产物,同时也是决定反应堆的动态和动力学行为的主要物质基础.某些裂变产物核在 β 衰变后放出缓发中子的事实,可利用来使反应堆易于控制.裂变产物中某些吸收中子本领特别大的核素(如氙-135和钐-149)的积累和耗失,也是严重影响到堆的某些动态行为的重要因素(所谓“中毒”).裂变链式反应的不断进行,引起堆中装载核燃料(铀-235、钚-239或铀-233)的不断消耗(燃烧).另一方面,当反应堆中配置有可转换物质铀-238或钍-232时,它们又会由于俘获中子后的 β 衰变而转化为新的核燃料钚-239或铀-233(转换或增殖).所有这些核反应过程除影响堆中中子的平衡外,都引起反应堆中材料组成的变化.

对于以显著功率运行的反应堆,影响动力学行为的因素更加复杂.除了上面所说的各种中子核反应的直接影响之外,还有由于功率释放所引起的温度和压力升高及物态变化的效应.要是没有冷却剂循环系统从堆内不断把热能引出,反应堆本来会很快由于所释放的大量能量而升温,导致堆中材料的烧坏、熔化甚至气化,因而自动崩溃或飞散.实际上,这也正是严重事故情况下,当冷却系统受阻、失灵,不能充分将堆中热量引出时,或功率上升过剧,超过冷却系统的载热能力时,会要出现的灾害性情况.即使在通常的非灾害情况下,反应堆中温度、压力的变化也会引起堆中各种材料的宏观密度和形状的改变,同时引起各种材料中原子核热运动状态的变化.后者又引起中子核反应中 Doppler 效应大小的改变.另一方面,冷却剂(不管是液体还是气体,如水或二氧化碳气)以相当高的流速通过反应堆中时,常常会引起堆中材料的机械振动,因而改变反应堆活性区栅格的相对尺寸,有时振幅甚至会因共振而大到使结构损坏的程度.当液体冷却剂(和慢化剂)在活性区中因过热而在局部或全部体积中沸腾并产生气泡时,则会由于显著改变堆中材料的表观密度而影响其中中子的运动和冷却剂的换热与载热能力(空穴效应).所有这些效应,都会反过来影响反应堆中中子和物质的核相互作用及中子在堆内的输运过程,从而间接影响反应堆的动力学行为(反馈效应).

反应堆的动态和动力学行为,通常由放在堆中不同部位的中子(及 γ 射线)探测器、温度计及流量计加以监测;并由控制棒系统抽出或放入控制棒而加以调节.

表 1.1 给出反应堆中牵涉到的各种过程进行所需特征时间的数量级.

表 1.1 反应堆中各种过程的特征时间

核反应(直接反应-形成复合核)	$\sim 10^{-21} - 10^{-17} \text{ s}$
瞬发中子发射	$\sim 10^{-17} \text{ s}$
瞬发光子发射	$\sim 10^{-14} \text{ s}$
(γ 射线, 中子)探测器响应	$\sim 10^{-11} - 10^{-7} \text{ s}$
中子一代时间(快堆-热堆)	$\sim 10^{-8} - 10^{-3} \text{ s}$
反应性反馈	$\sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ s}$
燃料温度变化	$\sim 10^{-1} - 10 \text{ s}$
温度流量指示	$\sim 10^{-1} - 10 \text{ s}$
控制棒移动	$\sim 0.5 - 10 \text{ s}$
缓发中子发射	$\sim 0.3 - 80 \text{ s}$
慢化剂温度变化	$\sim 1 - 10^3 \text{ s}$
铀及钚中毒	$\sim 10 \text{ h}$
燃耗、转换、增殖	$\sim 10 - 5 \times 10^2 \text{ d}$

我们将着重讨论特征时间在 $\sim 10^{-8} \text{ s}$ 至 $\sim 10 \text{ h}$ 范围内的动力学现象.更短得多的时间,对于反应堆动力学的研究来说,可以看成瞬时.对于牵涉到更长特征时

间的燃耗、转换及再生等问题,将只在探讨时空动力学时顺便涉及。

§ 1.1 物理基础

作为物理基础,我们将在本章中讨论裂变过程的各个方面,并且介绍在核反应堆动力学中有用的基本核物理数据。然后,我们将在简单(点堆)模型的基础上导出反应堆动力学的简化方程,而把建立在中子输运理论基础上的更严格的动力学方程及其与本章简化方程的关系留待探讨时空动力学时去讨论。

所有类型的裂变链式反应堆共同具备的、反应堆动力学的基本概念是**反应性**、**中子一代时间**及**缓发中子**。堆功率和中子水平升降的快慢主要依赖于反应性的大小。热堆和快堆之间在动态特性方面最重要的差别,在于中子一代时间的长短。各种核燃料(从堆动力学眼光看来)的主要区别在于对每种核燃料有不同分数的中子缓发产生。

核裂变反应虽然提供了形成中子链式反应的可能性,但要使它实现,还必须保证每代裂变放出的中子在引起下一代裂变之前不因非裂变吸收或漏泄而过多地损失。如果我们粗略地(更精确的定义在(1.25)式中给出)用 k 表示某时刻反应堆中裂变过程的总数和前一代裂变过程总数之比,也就是两代裂变中子总数之比,那么就只有 $k=1$ 或 $k>1$ 时,中子裂变链式反应才能在堆中平稳地或发散地进行下去。当 $k<1$ 时,各代裂变过程的总数越来越少,链式反应到一定程度就进行不下去了。

一般把 k 叫做**有效增殖因子**,而把 $\rho = \frac{k-1}{k}$ 叫做反应堆的**反应性**。 k 或 ρ 反映反应堆的整体性质,决定于中子在堆中的整个输运过程,因此依赖于堆的大小、堆中不同材料的相对量和密度以及中子在各种材料原子核上的相互作用(散射、俘获和裂变)截面。由于所有这些因素都受到温度、压力以及裂变的其它效应的影响,所以反应堆的反应性依赖于堆的功率史。这种反应性“反馈”的计算是反应堆动力学的中心问题之一。

中子一代时间是中子在反应堆中再生的平均时间。它也是反应堆的一种整体性质。在裂变由快中子产生的快堆中,中子一代时间可以短到 10^{-8} s;而在热堆(其中中子由裂变产生后先大大慢化,直到能量降到介质原子核的热运动能量附近,然后再“热”能扩散,并引起核燃料裂变)中,却可达到 10^{-3} s的数量级。中子一代时间主要依赖于一个典型中子在一核反应中被吸收或从堆中漏出之前所经受的散射碰撞次数和它在这些碰撞之间的飞行长度和速度。

缓发中子虽然在裂变产生的中子中只占不到百分之一的分数,但在决定反应堆动力学的时间尺度方面却极为重要。这些中子是几种高激发的裂变碎片在经过 β 衰变后的核跃迁过程中放出的。有关 β 衰变的半寿命决定缓发中子在裂变后放出

的半寿命. 关于缓发中子的半寿命和产额, 以后将在 § 1.4 中给出.

当 k 值足够大, 使中子链式反应只靠瞬发中子(裂变“瞬间”放出的中子, 参见表 1.1)就能自持时, 中子一代时间在决定时间尺度方面起支配作用. 如果反应堆超出临界不太远, 单靠瞬发中子不足以维持裂变链式反应, 而需要缓发中子来补充, 后者的相对大的缓发时间就对反应堆动态变化的时间尺度起支配作用. 要是所有中子都瞬发, 用常规机械手段(如移动燃料、中子吸收体或反射层)来控制堆就会是极端困难的, 因为中子一代时间短, 要求有高频响应来补偿堆中反应性的变化. 而快堆(其中中子一代时间可短到 $\sim 10^{-8}$ s)的控制, 就会是真正不可能的了. 事实上, 缓发中子在控制裂变率方面的重要性, 早在 1940 年就已经被预见到了^[1].

§ 1.2 裂变中能量、质量和电荷的分布

核裂变过程的仔细描述是十分复杂的. 这里我们将只就反应堆中最常见的、由中子引起的、分成两个差不多大小碎片的裂变过程, 考查裂变能量释放的形式和裂变产物的质量和电荷分布.

任一个原子核, 只要在一充分高的激发态都可以进行裂变. 在由中子引起的裂变中, 激发能来自打到靶核上的中子能量和中子加到靶核上的结合能. 为使裂变成为可能, 所需的最小入射中子能量叫中子裂变阈, 或简称裂变阈. 如果入射中子和靶核形成复合核时, 所放出的结合能大于复合核裂变所需的激发能, 中子裂变阈就小于零, 即裂变可由热中子引起. 具有这种性质的原子核称为易裂变核. 三个最重要的易裂变核是众所周知的 ^{233}U , ^{235}U 及 ^{239}Pu . 表 1.2 给出了一些原子核的中子裂变阈.

表 1.2 中子裂变阈^[2]

靶核	^{232}Th	^{233}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{237}Np	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
复合核	^{233}Th	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{237}U	^{239}U	^{238}Np	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{243}Pu
中子裂变阈/MeV	1.3	<0	0.4	<0	0.8	1.2	0.4	<0	~ 0	~ 0	~ 0

裂变过程中放出的能量——裂变能, 可从复合核和裂变碎片核的质量亏损数据算出. 以 ^{235}U 为例, 复合核 ^{236}U 的质量比它的(“平均模式”)裂变产物的总质量约大 0.218 u, 或约 203 MeV. 这能量的大部分很快($\sim 10^{-20}$ s 内)转化为二裂变碎片的动能, 这时两碎片间距离不过 $\sim 10^{-11}$ cm, 远在原子的最内层电子壳层之内. 裂变能的其余部分表现为变形碎片的激发能. 这激发能随后一部分通过发射瞬发中子($\sim 10^{-17}$ s 内)及瞬发 γ 射线($\sim 10^{-14}$ s 内)放出, 一部分通过 β 衰变和缓发中子及缓发 γ 射线的发射放出. β 衰变中发射的中微子也带走一部分(可达 ~ 10 MeV)

裂变能,但因中微子和物质的相互作用极为微弱,所以它们都漏出堆外,基本上不在堆内给出能量.表 1.3 给出 ^{233}U , ^{235}U 及 ^{239}Pu (由热中子引起的)“平均裂变”中所释放能量在不同形式间的分布.表中略去了 α 衰变所放出的少量($\sim 0.04\text{ MeV}$ /裂变)能量.

在计算每次裂变在反应堆中释放的能量时,还应当考虑中子辐射俘获反应的能量贡献.这效应的大小和中子在其中被俘获的物质有关.假定每个中子被俘获时放出 $\sim 7\text{ MeV}$ 的能量,而每次裂变产生的中子中最多有 ~ 1.3 个中子能被俘获,这就使得在表 1.3 所列的能量释放之外,还要加上折合到每次裂变的 $\sim 10\text{ MeV}$ 的能量.

表 1.3 ^{233}U , ^{235}U 及 ^{239}Pu 热裂变中能量的释放^[3] (单位: MeV)

释放形式	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
轻碎片动能	99.9 ± 1	99.8 ± 1	101.8 ± 1
重碎片动能	67.9 ± 0.7	68.4 ± 0.7	73.2 ± 0.7
裂变中子动能	5.0	4.8	5.8
瞬发 γ 射线能量	~ 7	7.5	~ 7
裂变产物的 β 衰变	~ 8	7.8	~ 8
裂变产物的 γ 衰变	~ 4.2	6.8	~ 6.2
总共	192	195	202

关于裂变产物的 β 及 γ 衰变能量随时间的变化 $\beta(t)$ 和 $\gamma(t)$, Way 及 Wigner 为“平均裂变”给出了下列有用的经验公式^[4]: 当时间 t 在裂变后 1 至 10^5 s 时,近似有

$$\beta(t) = 1.26t^{-1.2} \text{ MeV/s}, \quad (1.1-\beta)$$

$$\gamma(t) = 1.40t^{-1.2} \text{ MeV/s}, \quad (1.1-\gamma)$$

公式(1.1- γ)和以后 Левочкин 及 Соколов^[5] 对 ^{235}U , ^{239}Pu 的实验结果在统计误差范围内很好符合. 和 β 发射相伴的中微子能量约为电子能量的 ~ 1.5 倍. 因此, 在 $1 < t < 10^5\text{ s}$ 内, 裂变产物的总能量损耗率为 $2.5\beta(t) + \gamma(t)$. $t > 10^5\text{ s}$ (即 $> 1\text{ d}$) 时, 这总能量损耗率可由下列公式近似给出:

$$2.5\beta(t) + \gamma(t) \approx (3.9d^{-1.2} + 11.7d^{-1.4}) \times 10^{-6} \text{ MeV/s}, \quad (1.2)$$

式中 d 是以“日”为单位的时间. 当然, 中微子的能量贡献($\sim 1.5\beta(t)$)是观测不到的.

在大多数情形下, 裂变产生的二碎片具有不同的质量. 图 1.1 至图 1.3 分别给出了 ^{235}U , ^{233}U 及 ^{239}Pu , ^{238}U 及 ^{232}Th 由中子引起的裂变中, 各种质量数(72—165)碎片产额的分布^[6]. 分布曲线中碎片产额从曲线两翼(质量数 ~ 72 及 ~ 165 处)的约 $10^{-4}\%$ 变到二峰值(分别和轻、重碎片的最可几质量数 ~ 97 及 ~ 139 相应)处的