

核反应堆理论

第一卷

反应堆基本理论

[苏] C. M. 费因别尔格
C. E. 希霍夫 著
B. E. 特罗扬斯基
贾宝琳 译
谢仲生 许汉铭 校

原子能出版社

С. М. Фейнберг С. Б. Шихов В. Б. Троянский
Теория Ядерных Реакторов
Том 1
Москва Атомиздат 1978

核反应堆理论

第一卷

[苏] С. М. 费因别尔格
С. Б. 希霍夫 著
В. Б. 特罗扬斯基

贾宝琳 译

谢仲生 许汉铭 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆市枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张15.25·字数410千字

1985年9月第一版·1985年9月第一次印刷

印数 1—1,000·统一书号: 15175·563

定价: 3.45元

内 容 简 介

这是苏联关于核反应堆理论方面的第一本教科书。它是按照莫斯科工程物理学院自1952年起所用的教学大纲写成的。这一卷包括反应堆临界状态（单群、年龄和多群近似）、同位素成分变化、新核燃料再生产、结渣问题以及吸收棒计算，特别着重于非均匀反应堆理论（其中包括共振俘获理论）。第二卷讲反应堆中子输运理论，缓发中子动力学和微扰理论（苏联原子能出版社拟1980年出版）。

本书可作为核动力工程专业的大学生和研究生的教科书。

目 录

序	1
引言	2
第一章 链式过程基础	8
§1.1 核裂变、链式过程	8
§1.2 反应堆示意图、反应堆分类	11
第二章 单群近似情况下的反应堆临界尺寸	19
§2.1 四因子公式	19
§2.2 反应堆临界尺寸	23
§2.3 物质密度对临界参量的影响	36
§2.4 带反射层的反应堆的临界尺寸	36
§2.5 多区一维反应堆(多区矩阵卷积法)	44
§2.6 非稳态过程方程	48
§2.7 有效单群方程的推导	72
§2.8 有源反应堆	74
附录II2.1 基本扩散方程的推导	82
附录II2.2 外推边界	89
第三章 慢化理论基础	92
§3.1 中子弹性散射规律	92
§3.2 在无限均匀单一介质中弹性慢化的稳态方程	98
§3.3 无限单一无吸收介质内慢化方程的解	102
§3.4 有俘获的无限单一介质内慢化方程的解、逃脱俘获几率	110
§3.5 多种成分介质中的共振吸收	120
§3.6 窄共振和宽共振近似	127
§3.7 共振的多普勒效应	137
§3.8 对无限均匀介质中势散射和共振散射之间的干涉的考虑	144

附录II3.1 有俘获多种成分介质中的慢化方程的解	148
附录II3.2 某些特殊积分	155

第四章 中子输运方程..... 158

§4.1 中子平衡的积分-微分方程.....	158
§4.2 增殖介质的材料曲率	168
§4.3 材料曲率和渐近解	188
§4.4 慢化问题的年龄近似	203
§4.5 有吸收的慢化、源的叠加	210
§4.6 中子年龄的物理意义及其计算	224
§4.7 有限尺寸物体中的慢化	230

第五章 年龄近似和多群近似情况下的反应堆临界尺寸 249

§5.1 问题的提出	249
§5.2 年龄理论近似情况下的材料曲率和均匀堆的临界尺寸	252
§5.3 具有复杂中子谱的反应堆临界方程	260
§5.4 反应堆内的中子谱	264
§5.5 年龄近似情况下的条件临界问题	265
§5.6 多群方法的方程	270
§5.7 双群方法	273
§5.8 双群方法在带反射层的活性区中的应用	277
§5.9 多区反应堆的矩阵卷积	283
§5.10 任意能谱反应堆的多群计算、源迭代法.....	290
附录II5.1 在扩散近似情况下一般多群方程组的推导	298
附录II5.2 慢化中子谱和热中子谱之间的分界能的确定	305

第六章 反应堆的控制和调节 307

§6.1 控制系统的任务和手段	307
§6.2 吸收棒提供的反应性	310
§6.3 单群近似情况下控制棒的计算	311
§6.4 控制棒栅的单群计算	314
§6.5 对中子有透明性能的中心棒	318
§6.6 偏心棒	323

§6.7 棒系统、控制棒的干涉	326
-----------------------	-----

第七章 栅格理论332

§7.1 块效应概念	332
§7.2 热中子利用系数	334
§7.3 θ 的输运修正	353
§7.4 温度对 θ 的影响	357
§7.5 无慢化栅格块中的共振俘获	360
§7.6 考虑块内慢化的稀疏栅格共振俘获	372
§7.7 非均匀介质和均匀介质共振俘获的等价性定理	381
§7.8 快中子的增殖	383
§7.9 栅格内中子徙动长度	388
§7.10 非均匀反应堆的“均匀化”计算	390
附录II7.1 格林函数和互易定理	394
附录II7.2 未经碰撞的中子分布互易定理	396
附录II7.3 块内中子的碰撞几率	399

第八章 燃料同位素成分的变化、燃耗404

§8.1 燃耗方程	404
§8.2 核燃料的深燃耗	417
§8.3 反应堆的换料方案	426
§8.4 释热分布的展平	431

第九章 核燃料的再生产441

§9.1 再生系数	441
§9.2 临界和再生系数的关系	443
§9.3 钍燃料循环中的核燃料再生产	445
§9.4 快中子堆核燃料扩大再生产问题	449
§9.5 核燃料的倍增时间	453
§9.6 热中子增殖堆的燃料扩大再生产	456

序

《核反应堆理论》一书是在С.М.费因别尔格(С.М. Фейнберг)教授于莫斯科工程物理学院近三十年教学的讲义的基础上写成的。这本教科书向读者介绍反应堆的一般理论,至于反应堆的计算方法、计算精度、核常数等问题则涉及不多,这些问题将在以反应堆一般理论为理论基础的一些专门课程中讨论。当然,费因别尔格教授在多年的教学过程中,随着反应堆理论的发展,不断地对教学讲义做了补充和修改。

本书是按照目前莫斯科工程物理学院反应堆理论课程的讲授形式写成的。我们力求保留萨维利·莫伊谢维奇(Савелий Моисеевич)最初手稿的叙述方式和主要特征,并且期望本书在一定程度上能填补因创作者逝世所造成的空白。听过他的课的、莫斯科工程物理学院广大的学生和学习过这分讲义的教师,都在深切地怀念他。

我们特别感谢А.Д.加朗宁(А. Д. Галанин)教授,他仔细地评阅了本书的原稿,并作了许多有益的评注。Л. В.康斯坦丁诺夫(Л. В. Константинов)教授审阅了原稿,В. В.奥尔洛夫(В. В. Орлов)教授与我们讨论了第三章及第七章的部分内容,在此一併致谢。

С. Б.希霍夫

В. Б.特罗扬斯基

引 言

1978年是发现核裂变的四十周年。核裂变的发现是核物理学发展的重要里程碑。1939年1月6日报导了奥地利化学家哈恩的一条消息：他可靠地判明，在受到中子照射的铀中出现了钡的同位素，而照射之前它是肯定不存在于铀之中的。这个发现曾在1938年12月21日的报告中作了论述，报告指出，实验结果“与过去的所有核物理实验都矛盾”。因此，铀裂变的发现定为1938年。

这个现象的实质很快就被阐明了。1939年2月11日奥地利物理学家梅特涅尔以引人注目的标题《用中子分裂铀——核反应的新形式》发表了文章。

后来，爱因斯坦在《引自我最近的工作》一书中写道：“我不认为自己是原子能之父。我的参加是很间接的，实际上我并不相信原子能会在我这一代释放出来，这种可能性我曾认为只是理论上的，……。这是哈恩在柏林发现的，但是他本人不正确地解释了自己的发现，而梅特涅尔做了正确的解释。”

这些轰动一时的报导在全世界引起了强烈地反响。1939年是实验与理论方面的研究工作十分兴旺的一年。在列宁格勒的И. В. 库尔恰托夫(И. В. Курчатов)实验室里，Г. Н. 弗廖洛夫(Г. Н. Флёров)和К. А. 彼得扎克(К. А. Петржак)观察到了铀的自发裂变。铀的裂变为开发空前强大的能源开辟了前景，同时这样的能源在军事方面的利用也是很显然的。

从下面的摘录中可以清楚地看出这些激动人心的事件是怎样得到苏联物理学家们的响应的：“1939年11月15日到20日，苏联

* 见《Журн. эксперим. и теор. физ.》，1940，т. 10，Вып. 1，с. 7。

科学院物理-数学部在哈尔科夫(Харьков)召开了原子核物理学术问题会议。莫斯科、列宁格勒和各地大学的工作者们参加了会议(共计264人)。……

……А. И. 列依普斯基(А. И. Лейпунский)根据会议计划的第二部分‘中子’，做了《用中子分裂重原子核》的综合性报告。……

……大部分报告是关于铀分裂的。会议讨论了铀分裂时获得的产物问题，并明确了分裂现象的图象。铀分裂现象的核心问题，恐怕也是整个核物理学的核心问题。是实际利用这个现象所释放的巨大能量的可能性问题。铀核俘获中子引起铀核的分裂，并随之发射中子，后者又能被其它的核俘获，且又引起分裂。因此，在某些条件下可能产生铀分裂的分支状的核链式反应，同时释放巨大的能量。”(着重点是我们——作者加的)。

Я. Б. 泽尔多维奇(Я. Б. Зельдович)和Ю. Б. 哈里顿(Ю. Б. Харитон)计算了实现这种反应的可能性。他们指出：

“如果根据目前对反应的性质的很粗糙的了解，那么，不把铀的一种同位素浓缩或者不往铀里加氘，实现链式反应是不可能的。”

泽尔多维奇和哈里顿在《实验和理论物理学杂志》(Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1940)上连续发表了三篇文章，发展了自己的实际利用铀裂变链式反应的思想。在这些文章中，继续并补充了Ф. 佩尔林(Ф. Перрен)和Р. 帕伊尔斯(Р. Па́йерлс)于1939年做过的临界质量计算，并指出，使用含有较多的 ^{235}U 的浓缩铀，或者使用象重水这样弱俘获的慢化剂，可以实现热中子的链式反应。同时指出了快中子链式反应的可能性。

尤其重要的是泽尔多维奇和哈里顿发现了缓发中子的特殊作用。当有效增殖系数变化足够小时，缓发中子能提高系统的惰性，并在技术上得以实现对链式反应的控制。他们还指出了反应堆的自调节效应和产生自振荡的可能性。从而在理论上论证了建造核

反应堆，即实现可控链式反应装置的可能性，并讨论了反应堆安全的一些问题。这些工作的意义在反应堆建造的历史上是难以估量的。

1939年8月，约里奥-居里把一些 U_3O_8 块放在不同的慢化剂中，证实了在这样的系统的中心的铀裂变会在整个系统中引起裂变反应。约里奥-居里和他小组的实验取得了专利权。希特勒法西斯分子占领法国使这些工作被迫中断，约里奥-居里转入地下，他的实验室被破坏了。

由于第二次世界大战，核裂变反应的研究工作在各地都很快转入秘密进行。在美国这发生在爱因斯坦写信给罗斯福总统之后。爱因斯坦在由欧洲迁居来的费米、魏格纳、斯齐拉尔德等物理学家们的压力下所写的这封信里，坚决主张：为防止情报泄露到德国，有关铀裂变的全部工作要保密，并请求保证财政支持和加快原子能的研究。信中指出，如果铀弹制造成功，它的破坏力是非常大的。

1958年，罗伯特·容克在《比一千个太阳还亮》一书中写道：“当然，爱因斯坦那时之所以活动，是因为他相信，美国政府除非自身安全受到严重威胁，并为了对付同样的武器而自卫之外，在任何时候，不管是什么情况，它决不会使用这种骇人听闻的武器。”接着又写道：“战后爱因斯坦深感遗憾地说：‘假如我知道德国人制造不出原子弹，我是决不会过问这件事情的。’”

在苏联，1940年11月在莫斯科召开的全苏原子核物理学会议上，最后一次公开地讨论了该问题。会上库尔恰托夫和哈里顿作了实现链式反应条件的报告。会议提出了请求苏联政府大量拨款建造第一座反应堆的建议。但是，伟大卫国战争最初几年的艰苦条件妨碍了苏联原子能工业的迅速发展。

美国经过巨大努力之后，在费米领导下，在芝加哥建造的石墨作慢化剂的天然铀非均匀反应堆(CP-1)，于1942年12月2日达到临界。这是世界上第一座反应堆，是个没有专门导出热量系统的零功率装置。达到临界时的堆功率总共只有0.5瓦，直到12

月12日才达到200瓦。

随后，美国根据“曼哈顿计划”全面地开展了制造原子弹的工作。在花费了大量的精力和物质财富之后，于1945年之前造出了原子弹，后来出现了长崎和广岛的悲剧。

在库尔恰托夫领导下，在莫斯科建造的苏联第一座反应堆于1946年12月25日达到了临界，称之为Ф-1反应堆（第一个物理实验的铀锅炉）。这是欧亚大陆的第一座反应堆。

建造在距莫斯科105公里的奥布宁斯克(Обнинск)城的原子能发电站(АЭС)于1954年6月27日开始运转，设计功率5000千瓦。有充分理由可认为这是世界第一座原子能发电站，因为在此之前，美国、英国和苏联运行的反应堆都是“冷的”，而且都是为了军事目的生产钚的。

为了建立原子能发电站蒸气轮机的动力循环，需要高温和高压，而为了达到高温高压，必须解决工程技术和工艺上的许多问题。美国人也进行了类似的研究工作，但他们是为了制造潜艇上使用的核发动机原型装置。

1955年在日内瓦召开了和平利用原子能国际会议。在物理学家们的国际会议上，第一次展现出了在世界大型动力工程中利用核能的前景。有几十篇报告谈到核动力工程问题、用石墨和水做慢化剂的热中子反应堆（包括重水和沸水堆）和快中子反应堆问题，并预言了其经济前景。但是，由于积累的经验不足，对于建造原子能电站的成本及生产电能的成本问题未能做出确定的判断。

第一座“小型”原子能发电站投入运行几年之后，有了一些较大的原子能发电站（但还不是最大型的）开始运转：如在卡尔德豪尔(Calder Idoll)（英国）、希平港(Shippvngport)（美国）、西伯利亚(Сибирь)（苏联）等地的原子能发电站。到1976年1月1日止，全世界共有100座原子能发电站，总功率为 80×10^3 千瓦左右。根据这些数据，苏联国家利用原子能委员会主席А. М.佩特罗夏茨(А. М. Петросьянц)宣称：“普通的发电站要用近100年的时间，才能达到原子动力工程1975年所达到的

工程技术和使用水平。” [41]

1968年8月在莫斯科召开的第Ⅶ次国际动力工程会议(МИ-РЭК-Ⅶ)是核动力工程发展的里程碑,会上第一次成立了核动力工程组。从苏联代表团А. П.阿列克山德罗夫(А. П. Алексан-дров)和费因别尔格在会上宣读的头几篇报告以及外国学者们的报告中,可以得出:虽然压水型水-水反应堆(简称BBP或LWR)的基本建设投资是热电站(ТЭС)一倍半左右,但是它生产的电能价格已经可以与热电站的相竞争了。1968年热电站的电能价格约为0.7美分/千瓦·小时, LWR原子能电站的电能价格约为0.5美分/千瓦·小时,可见核电站的情况是有利的。现在完全可以预言,到2000年在世界总的燃料-动力平衡中,原子能电站产生的能量大约将占总能量的25%,大约占每年生产电能的50%。

“核动力”所用的燃料是天然铀,其中只有 $1/140$ 的 ^{235}U 才是真正的核燃料,剩下的是 ^{238}U 。热中子不能使它裂变,但在反应堆里, ^{238}U 被中子照射后,经过两次连续 β 衰变,变成 ^{239}Pu 。这个裂变性能很好的同位素,称为次级核燃料,提取后可在反应堆中重复使用。铀经过辐照之后,可用放射化学方法从中提取钚,并制成新的燃料元件(ТВЭЛ),再次加进反应堆中去,这种整个过程称为燃料循环。新核燃料的再生产可用这样的数字说明:按目前BBP反应堆工程的发展速度计算,生产的新核燃料如果不再重复使用,那么到1980年将能生产150—160吨钚。如果新核燃料的再生系数,即生成 ^{239}Pu 与烧掉 ^{235}U 的速度比(见§9.1)对于BBP是0.6左右,那么在重复使用钚的情况下,就有 $2.5/140$ 即1.8%左右的天然铀可以用于核动力工程(见§9.4)。重水堆和石墨堆的再生系数稍高一些,特别是当用金属铀(代替现在常用的二氧化铀)或用由铀-钍所构成的燃料,更是如此。但是,核燃料问题的根本解决办法还是利用快中子反应堆的燃料循环。

根据1948年的一些测量和计算结果,列依普斯基深信不疑地指出,如果在快中子反应堆中实现Pu-U-Pu循环,则再生系数肯定会大于1。这意味着核燃料可以扩大再生产,而且原则上所

有天然铀都可以用于动力工程目的。

在美国，1948年第一座快中子反应堆“克列门金娜”开始运转。五十年代和六十年代苏联在列依普斯基领导下连续建造了几座不太大的研究用快中子反应堆：用水银冷却的BP-1，其功率为300千瓦；零功率装置BP-2和BP-3；用钠冷却的BH-5，其功率为5000千瓦；以及最新的、用钠冷却的功率为6000千瓦的BOP-60。国外建造的一些同等量级功率的快中子堆发电站有：拥有整套高温冶金加工核燃料设备的EBR-2——“恩里科·费米”(Enrico Fermi)原子发电站(美国)；唐瑞(Dounreay)的快中子反应堆发电站(英国北苏格兰)；“狂想曲”(Rapsodie)反应堆(法国)。

1973年6月16日世界上功率最大的快中子堆电站BH-350在舍甫琴柯城(Шевченко)开始运行。正在建造的功率相近的装置还有：法国的快中子反应堆“凤凰”(Phenix)和英国的PFR；别洛亚尔斯克(Белоярск)的原子发电站正在进行第三期工程——快中子反应堆BH-600的建造工作。

目前在全世界开展的争取环境净化的斗争中，认为核动力能起不小的作用。因为原子发电站现在是最“干净的”能源：原子发电站不需要大气中的氧，在大气中的放射性落下灰可降低到最低水平，这点国内外都已多次检验过。核动力已迅速进入人类社会的生活中，并逐渐成为现代工业的基础。

本书讲述核反应堆——原子发电站和许多其它专用装置的“心脏”——的理论，这些专用装置包括研究用反应堆、生产新元素和新同位素的工业反应堆、辐照材料用的材料反应堆、放射化学反应堆、冶金及宇宙飞船和航空飞船用的反应堆等。可控的铀(或钚)链式裂变反应是这些反应堆的工作基础。

核反应堆理论是范围广泛的科学，它利用各种完善的数学方法研究大量的中子物理学问题。在这本书里，我们只能有选择地对反应堆理论的某些问题进行论述，作者认为，了解这些问题是理解核反应堆物理和继续研究有关问题的基础。

第一章

链式过程基础

§ 1.1 核裂变、链式过程

铀、钚和其它超铀元素的自持链式裂变反应是核反应堆的工作基础。质量数为 A 的铀核与中子结合形成复合核，进而引起铀的裂变（图1.1）。从许多可能的裂变反应道中列举两个反应道为例：

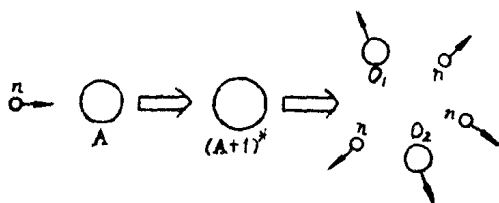
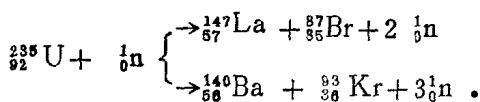


图1.1 核裂变示意图



裂变碎片谱有两个峰值（图1.2），分别在原子质量数90和140附近。有些碎片如 ${}_{54}^{135}\text{Xe}$ 和 ${}_{62}^{140}\text{Sm}$ 其俘获中子的截面很大，是有害的碎片。另外一些碎片如 ${}_{35}^{87}\text{Br}$ ，对裂变反应过程是有益的，是附加的（缓发的、次级的）中子源。

复合核裂变时放出次级中子。一次裂变放出的平均次级中子数 ν_f 约为2—3，但个别裂变反应的次级中子数可高达10。

除了裂变，还可能有吸收中子的其它过程，所以一个初级中子产生 $\nu < \nu_f$ 个次级中子。这 ν 个次级中子又可引起几个铀核裂

变，并产生 ν^2 个新中子，这样，中子数会雪崩般地增长，这个过程称为链式裂变过程。

可裂变同位素形成的激发态复合核可以经过下列过程转为稳态：1) 裂变；2) 辐射 γ 光子（辐射俘获）；3) 发射两个或两个以上的中子， $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 反应（在能量足够高的情况下）等；4) 发射中子和 γ 光子（非弹性散射）；5) 其它几率较小的反应： (n, α) 、 (n, p) 反应等。原子核势阱上的中子弹性散射不形成复合核。

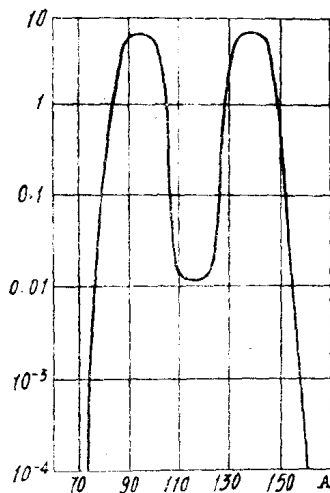


图1.2 ^{235}U 裂变碎片同位素产额

在反应堆中，某种核过程的几率用反应的微观截面描述： σ_f ——裂变截面， σ_c ——辐射俘获截面， σ_{in} ——非弹性散射截面， σ_s ——弹性散射截面， $\sigma_{n,2n}$ —— $(n, 2n)$ 反应截面等。

微观截面符号右上角的数码表示其所属的同位素，例如 $\sigma_c^{(8)}$ 、 $\sigma_c^{(5)}$ 、 $\sigma_c^{(9)}$ 、 $\sigma_c^{(0)}$ 、 $\sigma_c^{(1)}$ 等分别表示 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 的辐射俘获微观截面等等。

总截面 σ 等于所有核过程的截面之和。裂变截面与辐射俘获截面之和统称为吸收截面 σ_a ：

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c.$$

由于存在与裂变反应相竞争的核过程，必须引进增殖系数，

$$\nu = \nu_f \frac{\sum_f}{\sum_a},$$

它是增殖介质俘获一个初级中子产生次级裂变中子的平均数。裂变中子的平均能量约2兆电子伏，但是有的裂变中子能量可高达15—17兆电子伏。

实验确定：1) 不同的裂变物质，其裂变中子谱（即裂变中子

按能量的分布)亦不同, ^{235}U 裂变中子的平均能量(平均能量一般理解为“中位”能量 E_0 , 即低于 E_0 的裂变中子数等于高于 E_0 的裂变中子数)等于2兆电子伏, 2)裂变中子谱与初级中子能量有关, 但不明显, 仅在高能中子情况下显著。

反应堆用 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{232}Th 作为可裂变同位素。奇数同位素没有裂变阈, 即任何能量的中子都能使它裂变。偶数同位素, 只有能量大于某个定值——比裂变中子平均能量 E_0 小一点的阈能的中子才能使它裂变, 如 ^{238}U 的有效阈能是1.4兆电子伏左右。

能够进行无阈裂变的同位素才可称为核燃料, 因为缺少它们不可能实现自持链式裂变反应, 即不能建造反应堆。

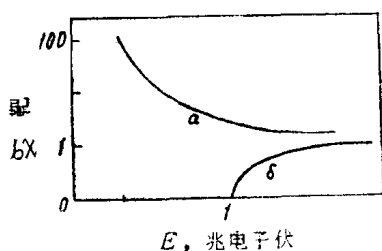


图1.3 σ_f 与能量的关系。

a. 无阈裂变情况;

b. 有阈裂变情况。

有阈裂变和无阈裂变曲线 $\sigma_f(E)$ 如图1.3所示。

如果假定包括裂变中子在内的所有中子能量都相同, 那么原则上链式裂变反应随时间的发展是可以描述的。这种简化了的反应堆模型称为单能模型。

根据中子截面定义, 中子通量 $\Phi = nv$ (n ——中子密度, v ——中子速度) 与宏观截面 $\Sigma = \rho\sigma$ (ρ ——具有某种核反应截面 σ 的同位素的核浓度) 的乘积表示: 在1立方厘米的介质中, 这种核反应的速率 [如果 ρ 、 σ 、 Φ 的量纲分别是: $[\rho] = \text{核}/\text{厘米}^3$; $[\sigma] = \text{厘米}^2/\text{核}$; $[\Phi] = \text{中子}/(\text{厘米}^2 \cdot \text{秒})$]。宏观截面用符号 $\Sigma_f = \rho\sigma_f$ 、 $\Sigma_a = \rho\sigma_a$ 等表示, 这时, $\nu\Sigma_f\Phi - \Sigma_a\Phi = (\nu - 1)\Sigma_a\Phi$ 就是在1立方厘米中, 除去了俘获速率后的裂变中子产生率。在无限均匀介质中 (即与空间坐标无关), 这个表达式可给出中子密度变化率:

*根据ГОСТ 19849-71, 这个量叫中子通量密度, 但在本书采用“中子通量”这个术语, 因为在反应堆物理和核动力工程文献中所用的都是它。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{v} \frac{d\Phi}{dt} (\nu - 1) \Sigma_a \Phi.$$

解这个方程得到

$$\Phi(t) = \Phi(0) \exp[(\nu - 1)t/T_a], \quad (1.1.1)$$

其中 $T_a = 1/\nu \Sigma_a$ ——俘获中子的平均时间。相应地裂变速率 $N_f(t)$ 也按指数规律变化:

$$N_f(t) = \Sigma_f \Phi = N_f(0) \exp[(\nu - 1)t/T_a]. \quad (1.1.2)$$

当 $\nu > 1$ 时, 链式反应按指数规律加速; $\nu < 1$ 时按指数规律衰减; $\nu = 1$ 时建立稳态过程。

在多能(中子密度及中子截面与能量有连续的依赖关系)非均匀有限介质中, 也有这样的情况, 当然, ν 和 T_a 要另外定义。

§ 1.2 反应堆示意图、反应堆分类

现在讨论反应堆结构的示意图。反应堆由下列部分组成(图

1.4): 1——发生裂变过程的活性区, 它包括核燃料、慢化剂(在快中子反应堆里没有)和结构材料。充满反应堆活性区的所有材料统称为倍增(即增殖)介质; 2——中子反射层; 3——链式过程的控制和事故的防护系统; 4——导热系统(载热系统), 导出燃料核裂变时释放的热量; 5——防止中子和 γ 辐射的生物防护系统。

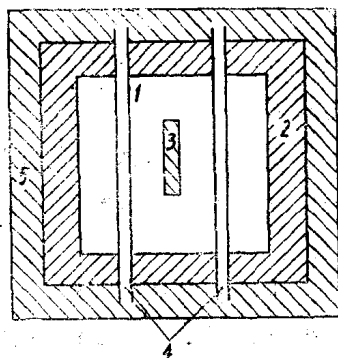


图1.4 核反应堆结构示意图

1. 活性区; 2. 反射层;
3. 可移动的吸收剂; 4. 载热剂系统; 5. 生物防护。

假定活性区很大, 则可忽略中子的泄漏, 并认为每个新产生的中子都被活性区某部分的原子核所俘获。在这样的倍增介质中, 俘获一个初级中子而产生的次级中子数叫做增殖系数, 用