



高等教育教材




核反应堆物理分析

上册



谢仲生 主编 罗经宇 审校



原子能出版社

高等教育教材

核反应堆物理分析

(第三版)

上册

谢仲生
尹邦华 编著
潘国品
罗经宇 审校

原子能出版社

(京)新登字 007 号

内 容 简 介

本书介绍核反应堆物理的基础理论和分析计算方法,分上下两册。上册内容包括:与堆物理有关的核物理知识,中子在介质中的扩散和慢化,临界理论,非均匀效应,燃耗,反应性控制和核反应堆动力学。下册内容包括:中子输运理论基础,慢化能谱的计算,多群扩散理论与数值计算方法,中子的热化,微扰理论和核燃料管理。

本书是高等学校核反应堆工程专业的教材,也可供有关专业的工程技术人员及研究人员参考。

高等教育教材
核反应堆物理分析
(第三版)
上册

谢仲生
尹邦华 编著
潘国品
罗经宇 审校

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号)

通讯处:北京市 2108 信箱,100037(邮编)

印 刷 原子能出版社印刷厂

经 销 新华书店总店 北京 发行所发行·新华书店经销
科技

开本 850×1168 mm 1/32 印张 12.5 字数 332 千字

1994 年 6 月北京第三版 2000 年 6 月北京第 4 次印刷

印数 4501—6000

ISBN 7-5022-1061 X/TL·650

定价:16.50 元

第三版前言

本书第2版自1985年出版发行以来,收到了许多读者及有关单位的宝贵意见与建议。同时近十年来,反应堆物理分析及计算方法又有了新的发展。为使本书更好地满足教学上的要求,1988年8月在哈尔滨召开的反应堆工程专业教材会议上,决定对本书进行全面修订。

本版书仍然保持第二版书的上下册结构。上册以中子扩散理论为基础,着重介绍反应堆物理的基本内容,可作为本科生的必修课教材;下册介绍中子输运理论基础和反应堆物理计算方法,可作为本科生选修课或研究生课教材。修订工作中,本着少而精和理论联系实际的原则,对全书各章内容进行了全面的修改,删去了不必要或超过教学大纲要求的章节,补充了一些新的内容,并加强了物理概念和实用内容阐述。此外,在上册各章增加了习题。对于带*号章节,低学时的专业可根据具体情况选用。

本版书修订工作由西安交通大学谢仲生和尹邦华教授负责。第八章由尹邦华、谢仲生重写,第十四章由尹邦华编写。本书由清华大学罗经宇教授审校。

侯凤旺、程平东、陈仁济、徐及明、单文志、杨修周和童舜坤等参加了本书修订大纲的讨论并提出许多有益的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

1992年10月

再版前言

一九八二年五月,核工业部教育司组织有关高等学校,对本书第一版使用情况进行了交流、总结,并决定对本书进行修订再版。

修订再版本分上下两册。上册着重介绍核反应堆物理的最基本的内容,包括:与堆物理有关的核物理知识,中子在介质中的扩散和慢化,临界理论,非均匀效应,燃耗,反应性控制和核反应堆动力学。下册着重介绍核反应堆物理计算方法,包括:中子输运理论基础,慢化能谱的计算,多群扩散理论与数值计算方法,中子的热化和微扰理论。各校可根据教学大纲的具体要求选择有关内容进行讲授。

一九八三年九月,对修订再版本的初稿进行了深入的讨论,有关同志提了许多宝贵意见和建议。因此,编者和审校者对该书稿再次进行了修改。

本书由西安交通大学谢仲生主编。参加修订本书工作的有:西安交通大学的谢仲生、尹邦华、傅龙舟,上海交通大学潘国品。全书由清华大学罗经宇审校。

侯凤旺、张育曼、李植华、杨修周、吴清泉、龚世璋、徐及明、刘正纶、单文志等同志参加了本书修订再版初稿的讨论并提出许多宝贵意见。在此,我们表示衷心的感谢。

编者

一九八四年四月

前 言

本书是根据 1978 年 6 月在北京召开的反应堆工程专业教材会议审定的《核反应堆物理分析》编写大纲编写的。

本书着重介绍核反应堆物理的基础理论和分析方法,以及核设计中一些基本的计算方法。在编写中,努力贯彻理论联系实际的原则并尽量反映反应堆物理近代计算方面的内容。在内容的选择和安排上,力求做到由浅入深,浅显易懂,尽量避免艰深的理论和复杂的公式推导。对于各种计算方法和程序,则着重于阐述它们之间具有共性的理论基础和算法思想,尽量避免过多的具体数学过程。

全书共分十三章。第一章介绍与堆物理有关的中子物理知识;第二至九章讨论中子在反应堆系统内运动的基本规律(扩散、慢化和热化等)以及临界问题的计算;第十至十二章则属于动态方面的问题;第十三章介绍微扰理论基础。带*号部分是属于参考性的章节,可根据具体情况选用,也可作为课外阅读的参考材料。由于各校反应堆工程专业的培养目标和教学时数不同,使用本书时,可根据具体情况对部分章节内容作适当的删减或补充。

阅读本书的读者应具有高等数学、原子核物理、数理方程和数值分析等方面的知识。

本书由谢仲生主编。参加编写的有:西安交通大学尹邦华(第一、六、八章,附录和第五章第 2 节)、于文观(第二、三章)、傅龙舟(第

十二章)、谢仲生(第四、五、七、九、十三章和第一章第7节)和上海交通大学潘国品(第十、十一章)。

本书由清华大学罗经宇审校。他对本书各章内容和主要公式都进行了详细、认真的审校并提出许多宝贵的意见和建议。在此编者表示衷心的感谢。

在本书编写过程中得到了有关科研和设计单位的大力支持和帮助。许汉铭、马大园、蒲富庠、杨顺海、章宗耀、徐及明、刘正纶、李植华、侯凤旺、杨修周、邬国伟和吴清泉等同志参加了本书初稿的讨论并提出许多宝贵意见;许汉铭、马大园同志参加了本书的定稿工作,并提出了许多宝贵的修改意见,对提高书稿质量有很大帮助。在此,我们表示深切的谢意。

由于我们水平有限,工程实践和教学经验不足,加之编写时间匆促,书中缺点和错误一定不少,恳切地希望同志们批评指正。

编 者

1980年3月

目 录

第一章 核反应堆的核物理基础	(1)
1. 中子与原子核的相互作用	(1)
1.1 中子	(1)
1.2 中子与原子核相互作用的机理	(2)
1.3 中子的散射	(6)
1.4 中子的吸收	(7)
1.5 核反应堆内中子与物质的作用	(9)
2. 中子截面和核反应率	(10)
2.1 微观截面	(11)
2.2 宏观截面、平均自由程	(12)
2.3 核反应率、中子通量密度和平均截面	(16)
2.4 截面随中子能量的变化	(20)
2.5 核数据库	(26)
3. 共振吸收	(28)
3.1 共振截面——单能级布勒特-魏格纳公式	(29)
3.2 多普勒效应	(31)
4. 核裂变过程	(34)
4.1 裂变能量的释放、反应堆功率和中子通量密度的关系	(34)
4.2 裂变产物与裂变中子的发射	(37)
5. 热中子能谱和热中子平均截面	(41)
5.1 热中子能谱和中子温度	(41)
5.2 热中子的平均截面	(45)
6. 链式裂变反应	(47)
6.1 自续链式裂变反应和临界条件	(47)

6.2 热中子反应堆内的中子循环	(51)
参考文献	(55)
习题	(56)
第二章 单速中子扩散理论	(58)
1. 单速中子扩散方程	(59)
1.1 斐克定律	(60)
1.2 单速扩散方程的建立	(65)
1.3 扩散方程的边界条件	(68)
1.4 斐克定律和扩散理论的适用范围	(71)
2. 非增殖介质内中子扩散方程的解	(72)
3. 扩散长度	(80)
4. 反照率	(84)
5. 扩散方程的积分形式	(86)
参考文献	(89)
习题	(89)
第三章 中子慢化和慢化能谱	(94)
1. 中子的弹性散射过程	(95)
1.1 弹性散射时能量的变化	(96)
1.2 弹性散射中子能量的分布	(99)
1.3 对数能降和平均对数能降增量	(100)
1.4 平均散射角余弦	(102)
1.5 慢化剂的选择	(103)
1.6 弹性慢化时间	(104)
2. 无限均匀介质内中子的慢化能谱	(106)
2.1 无限均匀介质内中子的慢化方程	(106)
2.2 在含氢介质内的慢化	(109)
2.3 在 $A > 1$ 的无限介质内的慢化	(112)
3. 均匀介质中的共振吸收	(117)
3.1 共振峰间距很大时的逃脱共振吸收几率	(117)

3.2 有效共振积分的近似计算	(122)
3.3 温度对共振吸收的影响	(123)
4. 扩散-年龄近似	(126)
4.1 扩散-年龄近似简介	(126)
4.2 中子年龄	(128)
5. 分群扩散近似	(132)
参考文献	(135)
习题	(135)
第四章 均匀反应堆的临界理论	(138)
1. 均匀裸堆的单群理论	(139)
1.1 均匀裸堆的单群扩散方程及其解	(139)
1.2 热中子反应堆的临界条件	(143)
1.3 各种几何形状的裸堆的几何曲率和中子通量密度分布	(147)
1.4 反应堆曲率和临界计算任务	(153)
1.5 单群理论的修正	(155)
2. 有反射层反应堆的单群扩散理论	(157)
2.1 反射层的作用	(157)
2.2 一侧带有反射层的反应堆	(158)
2.3 反射层节省	(166)
2.4 中子通量密度分布不均匀系数和中子通量密度 分布展平的概念	(170)
2.5* 曲率迭代法	(172)
3. 双群扩散理论	(174)
3.1 双群常数与双群方程	(174)
3.2 双群方程的解	(177)
3.3 双群临界方程及中子通量密度分布	(181)
4. 多群扩散理论	(188)
5. 年龄理论的临界条件	(190)
参考文献	(192)

习题	(192)
第五章 栅格的非均匀效应	(199)
1. 栅格的非均匀效应概述	(200)
2. 栅格的均匀化处理	(202)
2.1 栅格的均匀化	(202)
2.2 均匀化有效截面的计算	(204)
3. 扩散理论的应用,不利因子和热中子利用系数	(208)
3.1 热中子不利因子和热中子利用系数概念	(209)
3.2 用扩散理论计算 ξ 及 f	(210)
4. 用碰撞几率方法计算 ξ 和 f	(214)
4.1 碰撞几率	(215)
4.2 用A.B.H.方法计算 ξ 和 f	(221)
5. 快中子倍增效应	(226)
6. 栅元有效共振积分	(228)
6.1 栅元有效共振积分的计算	(229)
6.2 有效共振积分的半经验公式	(234)
6.3 互屏效应及丹可夫修正因子	(237)
7. 栅格几何参数的选择	(239)
参考文献	(242)
习题	(243)
第六章 反应性随时间的变化	(245)
1. 核燃料中重同位素成分随时间的变化	(245)
1.1 核燃料中重同位素的燃耗方程	(245)
1.2 核燃料中重同位素燃耗方程的解	(250)
2. 裂变产物中毒	(253)
2.1 氙 135 中毒	(255)
2.2 钐 149 中毒	(270)
2.3 其它裂变产物中毒	(272)
3. 反应性随时间的变化与燃耗深度	(274)

3.1 反应性随时间的变化与堆芯寿命	(274)
3.2 燃耗深度	(277)
4. 核燃料的转换与循环	(279)
4.1 转换与增殖	(279)
4.2 几种动力堆的燃料循环	(286)
5. 核燃料管理	(290)
参考文献	(296)
习题	(296)
第七章 温度效应与反应性控制	(300)
1. 反应性温度系数	(301)
1.1 反应性温度系数及其对核反应堆稳定性的影响	(301)
1.2 燃料温度系数	(303)
1.3 慢化剂温度系数	(304)
1.4 温度系数的计算	(308)
1.5 其它反应性系数	(309)
2. 反应性控制的任务和方式	(310)
2.1 反应性控制中所用的几个物理量	(310)
2.2 反应性控制的任務	(312)
2.3 反应性控制的方式	(313)
3. 控制棒控制	(314)
3.1 控制棒的作用和一般考虑	(314)
3.2 单根中心控制棒价值的计算	(315)
3.3 控制棒等效截面的计算	(318)
3.4 控制棒插入深度对控制棒价值和功率分布的影响	(326)
3.5 控制棒间的干涉效应	(332)
4. 可燃毒物控制	(335)
5. 化学补偿控制	(340)
参考文献	(343)
习题	(344)

第八章 核反应堆动力学	(346)
1. 不考虑缓发中子的核反应堆动力学	(347)
2. 考虑缓发中子的点堆动态方程	(350)
3. 阶跃扰动时的点堆模型动态方程的解	(353)
4. 反应堆周期	(358)
5* . 点堆动态方程的近似解法	(364)
5.1 单组缓发中子	(364)
5.2 常源近似	(370)
5.3 瞬跳近似	(370)
参考文献	(373)
习题	(373)
附录	(375)
附录 1 国际单位制(SI)	(375)
附录 2 物理常数	(377)
附录 3 换算因子	(378)
附录 4 元素与一些分子的截面和核参数	(379)
附录 5 非 $1/v$ 因子	(384)
附录 6 $\psi(\zeta, x)$ 和 $\chi(\zeta, x)$ 的表	(384)
附录 7 丹可夫因子	(386)
附录 8 δ 函数	(386)
附录 9 指数积分函数	(387)
附录 10 $E_n(x)$ 函数	(388)
附录 11 误差函数 $\text{erf}(x)$	(388)
附录 12 贝塞尔函数	(389)

第一章 核反应堆的核物理基础

核反应堆是一种能以可控方式产生自持链式裂变反应的装置。它由核燃料、冷却剂、慢化剂、结构材料和吸收剂等材料组成。核反应堆内的主要核过程是中子与核反应堆内各种元素的相互作用的过程。热中子反应堆内,裂变中子具有2兆电子伏左右的平均能量,首先经过与慢化剂原子核的碰撞而被慢化到热能,最后被各种材料的原子核所吸收。其中核燃料吸收中子则将引起新的裂变。因此,在讨论核反应堆的物理过程之前,必须对不同能量的中子与各种材料的原子核的相互作用有一定的了解。本章首先概略地介绍核反应堆物理分析中常碰到的有关中子与原子核相互作用的一些核物理知识,然后定性地讨论实现自持链式裂变反应的条件和热中子反应堆内的中子循环过程。

1. 中子与原子核的相互作用

1.1 中 子

中子是组成原子核的核子之一,它的静止质量稍大于质子的静止质量。

$$\begin{aligned} \text{中子的静止质量} \quad m &= 1.6749543 \times 10^{-27} \text{ 公斤} \\ &= 1.0086650 \text{ 原子质量单位} \end{aligned}$$

工程计算中通常取 m 等于1原子质量单位。

中子不带电荷,因此它在靠近原子核时不受核内正电的斥力;它亦不能产生初级电离。中子在原子核外自由存在时是不稳定的,它通过 β 衰变转变成质子,其半衰期约为12分钟。在热中子反应堆

内,瞬发中子的平均寿期约为 10^{-6} 至 10^{-4} 秒,它比自由中子的半衰期短得多,因此在反应堆物理分析中可以不考虑自由中子的不稳定性问题。

中子具有粒子性和波动性。它与原子核的相互作用过程有时表现为两个粒子的碰撞,有时表现为中子波与核的相互作用。中子的波长 λ 为

$$\lambda = \frac{2.86 \times 10^{-11}}{\sqrt{E}} \text{ 米} \quad (1-1)$$

式中 E 为中子能量,电子伏。(这里取中子静止质量 m 等于 1。)

在实际计算中,一般用中子折算波长 λ :

$$\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{4.55 \times 10^{-12}}{\sqrt{E}} \text{ 米} \quad (1-2)$$

从(1-1)式可知,中子波长随能量增加而变短。例如, $E=1$ 兆电子伏时, λ 约等于 10^{-11} 米数量级,和原子核的直径相当;即使能量降低到 $E=0.01$ 兆电子伏时, λ 约等于 4.55×10^{-11} 米,也和原子的直径相当,但比起平均自由程或宏观尺寸要小许多个数量级。因此,除非对于能量非常低的中子外,在讨论中子的运动时,把它看成为一个粒子来描述是适当的。

后面我们将看到,中子的能量不同,它与原子核相互作用的方式、几率也就不同。在反应堆物理分析中通常按中子能量把它们分为:(i)快中子(0.1兆电子伏以上);(ii)超热中子(1电子伏到0.1兆电子伏);(iii)热中子(1电子伏以下)。

1.2 中子与原子核相互作用的机理

中子与原子核的相互作用过程有三种:势散射、直接相互作用和复合核的形成。

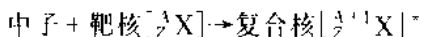
势散射是最简单的核反应,它是中子波和核表面势相互作用的结果。此情况下的中子并未进入靶核。任何能量的中子都有可能引起这种反应。这种作用的特点是:散射前后靶核的内能没有变化。

入射中子把它的一部分或全部动能传给靶核,成为靶核的动能。势散射时,中子改变了运动的方向和能量。势散射前后中子与靶核系统的动能和动量守恒,所以势散射为一种弹性散射。

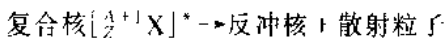
所谓直接相互作用是指:入射中子直接与靶核内的某个核子碰撞,使某个核子从核里发射出来,而中子却留在核内。如果从靶核里发射出的核子是质子,这就是直接相互作用(n,p)反应。如果从核里发射出来的核子是中子,而靶核发射 γ 射线,同时由激发态返回基态,这就是直接非弹性散射过程。入射中子要具有较高的能量才能与原子核发生直接相互作用。不过,在核反应堆内具有那样高的能量的中子,其数量是很少的。所以在反应堆物理分析中,这种直接相互作用方式是不重要的。

复合核的形成是最重要的中子与原子核的相互作用形式。在这个过程中,入射中子被靶核 A_ZX 吸收,形成一个新核——复合核 ${}^{A+1}_ZX^*$ 。中子和靶核两者在质心坐标系的总动能 E_0 就转化为复合核的内能。同时中子的结合能 B 也给了复合核, J 是使复合核处于基态以上的激发态(或能级) $E_0 + B - J$ (见图 1-1);然后,经过一个短时间,复合核衰变或分解放出一个粒子(或一个光子),并留下一个余核或反冲核。这两个阶段可写成以下形式:

(1) 复合核的形成:



(2) 复合核的分解



这里,*号表示复合核处于激发态。

激发态的复合核衰变或分解有多种方式。由于激发的能量是统计地分配在许多核子上的,因此复合核可以在激发态上停留一段时间。当核内某一个或一组核子得到足够的能量时,复合核便通过放出一个核子或一组核子而衰变。若放出一个质子而衰变,就称之为(n,p)反应;放出 α 粒子的衰变称之为(n, α)反应(如图 1-1 所示)。

若放出的核子是一个中子,而余核 X 又重新直接回到基态,就称这个过程为**共振弹性散射**或称为**复合弹性散射**,简称 (n,n) 反应。如果放出中子后,余核 X 仍处于激发态,然后通过发射 γ 射线返回基态,就称这个过程为**共振非弹性散射**或者称为**复合非弹性散射**,简称 (n,n') 反应。复合核一旦通过发射俘获 γ 射线而衰变,称这个过程为**辐射俘获**,简称 (n,γ) 反应。复合核还可以通过分裂成两个较轻的核的方式而衰变,称这一过程为**核裂变**,简称 (n,f) 反应。

当入射中子的能量具有某些特定值恰好使形成的复合核激发态接近于一个量子能级时,那么形成复合核的几率就显著地增大。这种现象就叫做**共振现象**(包括共振吸收,共振散射和共振裂变等)。共振吸收对反应堆的物理过程有着很大的影响。

可以发现,天然放射性的基本定律,即某个系统在单位时间的衰变几率为一常数,也适用于核在激发态的自发衰变。这个常数称为衰变常数 λ 。但是,在讨论激发态的衰变时,通常用一个能级宽度 Γ 的新量来表示衰变常数 λ 和描述处于激发态的核的衰变,能级宽度 Γ 的定义为:

$$\Gamma = h \lambda \text{ 电子伏} \quad (1-3)$$

式中 h 为普朗克常数 h 除以 2π ,即 $h = h/2\pi$ 。显然 Γ 的量纲是能量,换句话说, Γ 是用能量单位表示的激发态的衰变常数。

这样,复合核的能级宽度的 Γ 的激发态,其平均寿命 t 便等于:

$$t = \frac{1}{\lambda} = \frac{h}{\Gamma} \quad (1-4)$$

由此可见,复合核的激发态的寿命与能级宽度成反比。现在已经测出了许多核的激发态的能级宽度。例如,铀-239在第一个虚能级处的俘获共振宽度 Γ 为0.027电子伏,因而由(1-4)式可以算出这一状态的平均寿命 t 为 2.4×10^{-14} 秒。

因为一个复合核常常能通过几个方式发生衰变,就是说,可能放出中子、质子或 γ 射线等等。单位时间内处于激发态的复合核的某种衰变方式的几率,可以用该过程的能级分宽度来表示。例如,发射