



普通高等教育“十五”国家级规划教材

核反应堆物理分析

(修订本)

谢仲生 主编

谢仲生 吴宏春 张少泓 编著

西安交通大学出版社
原子能出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

核反应堆物理分析

(修订本)

谢仲生 主编

谢仲生 吴宏春 张少泓 编著

西安交通大学出版社
原子能出版社

内容简介

本书介绍核反应堆物理的基础理论、物理过程和分析计算方法。内容包括：与堆物理有关的核物理知识，中子在介质中的慢化和扩散，临界理论，非均匀堆的计算、燃耗、反应性控制、反应堆动力学和堆芯燃料管理。

本书是高等学校核能科学与工程专业的教材，也可供核科学与技术有关专业的工程技术人员及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆物理分析(修订本)/谢仲生主编. —西安:西安交通大学出版社, 2004. 7

ISBN 7-5605-1810-9

I. 核... II. 谢... III. 反应堆物理学 IV. TL32
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 127203 号

- 书 名 核反应堆物理分析(修订本)
主 编 谢仲生
出版发行 西安交通大学出版社
原 子 能 出 版 社
地 址 西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话 (029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
印 刷 陕西新世纪印刷厂
字 数 369 千字
开 本 727mm×960mm 1/16
印 张 20
版 次 2004 年 7 月第 1 版 2005 年 8 月第 2 次印刷
印 数 1 001~2 300
书 号 ISBN 7-5605-1810-9/TL·6
定 价 26.00 元

版权所有 侵权必究



前 言

《核反应堆物理分析》(原子能出版社,1980年)自出版以来,已经历了两次修订再版,并被确定为全国高等教育教材,为许多高等院校所采用,对我国核反应堆工程及核电人才的培养起到了积极的作用。该教材于1987年获得了原核工业部优秀教材特等奖,1997年获核工业总公司科学技术进步三等奖。

近年来,核科学技术,特别是计算机和计算科学的迅速发展,显著地促进了核反应堆物理理论与计算方法的发展。特别是近20年来,随着核能事业的发展,许多有效的、高精度的计算方法和计算机软件已经在工程设计中获得了广泛的应用。原教材中的部分内容,如传统的四因子理论和计算方法已难以适应现代核设计的要求。因而,许多工程技术人员和高等学校的教师们从他们工程实践和近年来的教学实际经验出发,都深感原来的《核反应堆物理分析》教材已适应不了当前核能发展和教学的需要,希望能对该书在原来的基础上作较大的修改,并补充反映近年来反应堆物理理论、核燃料管理计算以及设计方法方面最新发展的内容。这就是本书编写的由来。2002年教育部经专家评审,批准将本书列入了国家“十五”重点教材建设规划的选题。

本书是在原教材《核反应堆物理分析》(谢仲生主编,原子能出版社,1994年第3版)及其改编本《核反应堆物理理论与计算方法》(谢仲生、张少泓编著,西安交通大学出版社,2000年)两本书的基础上修订编写而成。着重介绍核反应堆物理的基础理论和计算方法。在编写中努力贯彻理论联系实际和少而精的原则,并尽可能地反映近20年来新发展的反应堆物理计算方法。在内容选择和安排上,力求做到由浅入深、深入浅出,尽量避免艰深的理论和繁杂的数学推导,对于各种计算方法和程序,着重阐述它们的基本原理、算法思想及其共性的分析方法;力求做到物理概念清晰、结合工程实际,便于读者理解和掌握方法的实质与应用。

全书共分10章。前3章讨论中子在介质中运动的基本规律(慢化和扩散);第4,5,6章讨论反应堆临界理论和分群扩散理论;第7,8,9章则属于反应堆物理动态问题,包括燃耗与中毒,反应性控制和反应堆动力学;第10章介绍压水堆的堆芯核燃料管理。书中带*号的章节属于参考性内容,可根据具体情况选用,也可作为学生课外阅读的参考资料。由于各高校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。本书讲授学时(不含带*号章节)建议为60~70学时。

阅读本书的读者应具有高等数学、原子核物理、数学物理方法和数学分析等方面知识。

本书由西安交通大学谢仲生教授主编并承担第3,6,7,8,9和第10章的编写,吴宏春教授参加第1,2章的编写,上海交通大学张少泓副教授参加第4,5章的编写。上海核工程研究设计院司胜义高级工程师参加第10章4.2节中PEARLS程序系统一节的编写。本书由中国核动力研究设计院章宗耀研究员和中国原子能科学研究院罗璋琳教授审校。本书的出版还得到西安交通大学出版社李志丹编辑和原子能出版社张辉编辑的帮助。作者在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,工程实践经验不足,书中难免会有疏漏和不当之处,恳切地希望读者批评指正。

编者

2003年10月于西安交通大学

目 录

第1章 核反应堆的核物理基础	(2)
1.1 中子与原子核的相互作用	(2)
1.1.1 中子	(2)
1.1.2 中子与原子核相互作用的机理	(2)
1.1.3 中子的散射	(4)
1.1.4 中子的吸收	(6)
1.2 中子截面和核反应率	(7)
1.2.1 微观截面	(7)
1.2.2 宏观截面、平均自由程	(8)
1.2.3 核反应率、中子通量密度和平均截面	(11)
1.2.4 截面随中子能量的变化	(14)
1.2.5 核数据库	(18)
1.3 共振吸收	(21)
1.3.1 共振截面——单能级布赖特-维格纳公式	(21)
1.3.2 多普勒效应	(22)

1.4 核裂变过程	(24)
1.4.1 裂变能量的释放、反应堆功率和中子通量密度的关系	(24)
1.4.2 裂变产物与裂变中子的发射	(26)
1.5 链式裂变反应	(29)
1.5.1 自续链式裂变反应和临界条件	(29)
1.5.2 热中子反应堆内的中子循环	(32)
参考文献	(34)
习题	(34)

第2章 中子慢化和慢化能谱

2.1 中子的弹性散射过程	(37)
2.1.1 弹性散射时能量的变化	(37)
2.1.2 散射后中子能量的分布	(39)
2.1.3 平均对数能降	(41)
2.1.4 平均散射角余弦	(42)
2.1.5 慢化剂的选择	(43)
2.1.6 中子的平均寿命	(44)
2.2 无限均匀介质内中子的慢化能谱	(45)
2.3 均匀介质中的共振吸收	(49)
2.3.1 均匀介质内有效共振积分及逃脱共振俘获概率	(49)
2.3.2* 有效共振积分的近似计算	(51)
2.4 热中子能谱和热中子平均截面	(54)
2.4.1 热中子能谱	(54)
2.4.2 热中子的平均截面	(57)
参考文献	(58)
习题	(58)

第3章 中子扩散理论

3.1 单能中子扩散方程	(62)
3.1.1 斐克定律	(62)
3.1.2 单能中子扩散方程的建立	(67)
3.1.3 扩散方程的边界条件	(69)
3.1.4 斐克定律和扩散理论的适用范围	(71)
3.2 非增殖介质内中子扩散方程的解	(72)

3.3* 反照率	(77)
3.4 扩散长度、慢化长度和徙动长度	(78)
参考文献	(83)
习题	(83)

第4章 均匀反应堆的临界理论

4.1 均匀裸堆的单群理论	(88)
4.1.1 均匀裸堆的单群扩散方程的解	(89)
4.1.2 热中子反应堆的临界条件	(91)
4.1.3 几种几何形状裸堆的几何曲率和中子通量密度分布	(94)
4.1.4 反应堆曲率和临界计算任务	(98)
4.1.5 单群理论的修正	(99)
4.2 有反射层反应堆的单群扩散理论	(101)
4.2.1 反射层的作用	(101)
4.2.2 一侧带有反射层的反应堆	(101)
4.2.3 反射层节省	(107)
4.3 中子通量密度分布不均匀系数和功率分布展平的概念	(109)
参考文献	(111)
习题	(111)

第5章 分群扩散理论

5.1 与能量相关的中子扩散方程和分群扩散理论	(115)
5.1.1 与能量相关的中子扩散方程	(115)
5.1.2 分群扩散理论及多群中子扩散方程	(117)
5.1.3 群常数的计算	(119)
5.2 双群扩散理论	(121)
5.2.1 双群方程	(122)
5.2.2 双群方程的解	(123)
5.2.3 双群临界方程及中子通量密度分布	(127)
5.3 多群扩散方程的数值解法	(129)
5.3.1 源迭代法	(130)
5.3.2 二维扩散方程的数值解法	(131)
参考文献	(137)
习题	(138)

第6章 栅格的非均匀效应与均匀化群常数的计算

6.1 栅格的非均匀效应	(139)
6.2 栅格的均匀化处理	(141)
6.2.1 栅格的均匀化	(141)
6.2.2 堆芯的均匀化截面的计算	(143)
6.3 栅元均匀化群常数的计算	(146)
6.3.1 积分输运理论的基本方程	(147)
6.3.2 碰撞概率方程的解及少群常数的计算	(149)
6.4 燃料组件内均匀化通量密度分布及少群常数的计算	(150)
6.5 共振区群常数的计算	(152)
6.5.1 非均匀栅元有效共振积分的计算	(153)
6.5.2 等价原理	(155)
6.5.3* 互屏(丹可夫)效应	(157)
6.5.4 温度对共振吸收的影响	(158)
6.5.5 共振区群常数的计算	(160)
6.5.6* 有效共振积分的半经验公式	(161)
6.6 栅格几何参数的选择	(161)
参考文献	(164)
习题	(164)

第7章 反应性随时间的变化

7.1 核燃料中重同位素成分随时间的变化	(165)
7.1.1 重同位素燃耗链及裂变产物链	(165)
7.1.2 核燃料中重同位素的燃耗方程	(167)
7.1.3 燃耗方程的求解	(169)
7.2 裂变产物 ¹³⁵ Xe和 ¹⁴⁹ Sm的中毒	(173)
7.2.1 ¹³⁵ Xe中毒	(173)
7.2.2 ¹⁴⁹ Sm中毒	(185)
7.3 反应性随时间的变化与燃耗深度	(187)
7.3.1 反应性随时间的变化与堆芯寿期	(187)
7.3.2 燃耗深度	(190)
7.4 核燃料的转换与增殖	(191)
参考文献	(196)

习题	(197)
----------	-------

第8章 温度效应与反应性控制

8.1 反应性系数	(200)
8.1.1 反应性温度系数及其对核反应堆稳定性的影响	(200)
8.1.2 燃料温度系数	(202)
8.1.3 慢化剂温度系数	(203)
8.1.4 其它反应性系数	(204)
8.1.5 温度系数的计算	(206)
8.2 反应性控制的任务和方式	(207)
8.2.1 反应性控制中所用的几个物理量	(207)
8.2.2 反应性控制的任務	(208)
8.2.3 反应性控制的方式	(209)
8.3 控制棒控制	(210)
8.3.1 控制棒的作用和一般考虑	(210)
8.3.2 控制棒价值的计算	(211)
8.3.3 控制棒插入深度对控制棒价值的影响	(212)
8.3.4 控制棒间的干涉效应	(215)
8.3.5 控制棒插入不同深度对堆芯功率分布的影响	(216)
8.4 可燃毒物控制	(217)
8.4.1 可燃毒物的作用	(217)
8.4.2 可燃毒物的布置及其对反应性的影响	(219)
8.4.3 可燃毒物的计算	(222)
8.5 化学补偿控制	(222)
参考文献	(226)
习题	(226)

第9章 核反应堆动力学

9.1 缓发中子的作用	(228)
9.2 点堆中子动力学方程	(230)
9.3 阶跃扰动时点堆模型动态方程的解	(234)
9.4 反应堆周期	(238)
9.4.1 反应堆周期	(238)
9.4.2 不同反应性引入时反应堆的响应特性	(240)

9.5*	点堆动力学方程的近似解法	(242)
9.5.1	单组缓发中子近似	(242)
9.5.2	常数缓发中子源近似	(245)
9.5.3	瞬跳近似	(245)
9.6	点堆动力学方程的数值解法	(246)
	参考文献	(250)
	习题	(251)

第10章* 压水堆堆芯燃料管理

10.1	核燃料管理的主要任务	(252)
10.1.1	核燃料管理中的基本物理量	(252)
10.1.2	核燃料管理的主要任务	(253)
10.2	多循环燃料管理	(255)
10.2.1	平衡循环及各参数之间的关系	(255)
10.2.2	初始循环与过渡循环	(261)
10.3	单循环燃料管理	(263)
10.3.1	堆芯换料方案	(263)
10.3.2	堆芯燃料管理计算	(267)
10.4	堆芯换料设计的优化	(270)
10.4.1	堆芯换料设计优化模型	(270)
10.4.2	堆芯换料设计优化方法简介	(272)
	参考文献	(284)

附录

附录1	国际单位制(SI)	(286)
附录2	基本常数	(288)
附录3	元素与一些分子的截面和核参数	(289)
附录4	非 $1/v$ 因子	(295)
附录5	δ 函数	(296)
附录6	$En(x)$ 函数	(296)
附录7	误差函数 $\text{erf}(x)$	(297)
附录8	贝塞尔函数	(297)

索引

第 1 章

核反应堆的核物理基础

核反应堆是一种能以可控方式实现自续链式核反应的装置。根据原子核产生能量的方式,可以分为裂变反应堆和聚变反应堆两种。当今世界上已建成和广泛使用的反应堆都是裂变反应堆,聚变反应堆目前尚处于研究设计阶段。裂变反应堆是通过把一个重核裂变为两个中等质量核而释放能量。它是由核燃料、冷却剂、慢化剂、结构材料和吸收剂等材料组成的一个复杂系统。按用途不同,裂变反应堆可分为生产堆、实验堆和动力堆。按冷却剂或慢化剂的种类不同可分为轻水堆、重水堆、气冷堆和液态金属冷却快中子增殖堆。按引起裂变反应的中子能量不同,又可分为热中子反应堆和快中子反应堆。

本书主要讨论裂变反应堆的物理理论基础和它的计算方法。尽管裂变反应堆包含许多类型,但其物理过程都是相类似的。所有裂变反应堆内的主要核过程都是中子与核反应堆内各种核素的相互作用过程。如在热中子反应堆内,裂变中子具有 2 MeV 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或逸出堆外,其中核燃料吸收中子将可能引起新的裂变。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经常用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续链式裂变反应的条件和热中子反应堆内的中子循环过程。这些核物理知识,读者在先修课程“原子核物理基础”或“核辐射物理”中均已熟悉,本章只是把在反应堆物理分析中需要用到的一些重要概念和结论加以概述。

1.1 中子与原子核的相互作用



1.1.1 中子

中子是组成原子核的核子之一,它的静止质量 m 稍大于质子的静止质量。在工程计算中,通常近似地取中子的静止质量为 1 u 。

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,中子通过 β 衰变转变成质子,其半衰期为 10.3 min 。在热中子反应堆中,瞬发中子的寿命约为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ s}$,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。

中子与其它粒子一样具有波粒二重性。它与原子核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。根据物质的波动理论,所有物质都伴随着波。能量为 $E \text{ eV}$ 的中子,其约化波长为

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

由(1-1)式可知,中子的波长随中子能量的降低而变长。不过即使中子能量降到 0.01 eV ,其波长也只有 $\bar{\lambda} = 4.55 \times 10^{-11} \text{ m}$,比最小的氢原子的直径还要小,比起中子的平均自由程和宏观尺寸更是要小许多个数量级。因此,除非对于能量非常低的中子,一般在反应堆中讨论中子的运动及中子和原子核的相互作用时,都把中子看作一个粒子来描述。

以后我们将会看到,中子的能量不同,它与原子核相互作用的概率、方式也就不同。在反应堆物理分析中,通常按中子能量的大小把它们分为以下三类:(1) 快中子($E > 0.1 \text{ MeV}$);(2) 中能中子($1 \text{ eV} < E < 0.1 \text{ MeV}$);(3) 热中子($E < 1 \text{ eV}$)。



1.1.2 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与入射中子的能量有关。概括地讲,在反应堆内中子与原子核的相互作用方式主要有: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,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。势散射后,中子改变了运动方向和能量。势散射前后中子与靶核系统的动能和动量守恒,势散射是一种弹性散射。

直接相互作用是入射中子直接与靶核内的某个核子碰撞,使其从核里发射出来,而中子却留在了靶核内的核反应。如果从靶核里发射出来的核子是质子,这就是直接相互作用的 (n, p) 反应。如果从核里发射出来的核子是中子,同时靶核由激发态返回基态放出 γ 射线,这就是直接非弹性散射过程。由于入射中子必须要有较高的能量才能与原子核发生直接相互作用,而在核反应堆内具有那样高能的中子数量是很少的,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。

复合核的形成是中子与原子核相互作用的最重要方式。在这个过程中,入射中子被靶核 A_ZX 吸收,形成一个新的核——复合核 ${}^{A+1}_Z X^*$ 。中子和靶核两者在它们质心坐标系中的总动能 E_c 就转化为复合核的内能,同时中子与靶核的结合能 E_b 也给了复合核,于是使复合核处于基态以上的激发态(或激发能级) $E_c + E_b$ (见图 1-1)。由于在复合核内激发能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停留一段时间,然后当由于核内的无规则碰撞,激发能在核子间

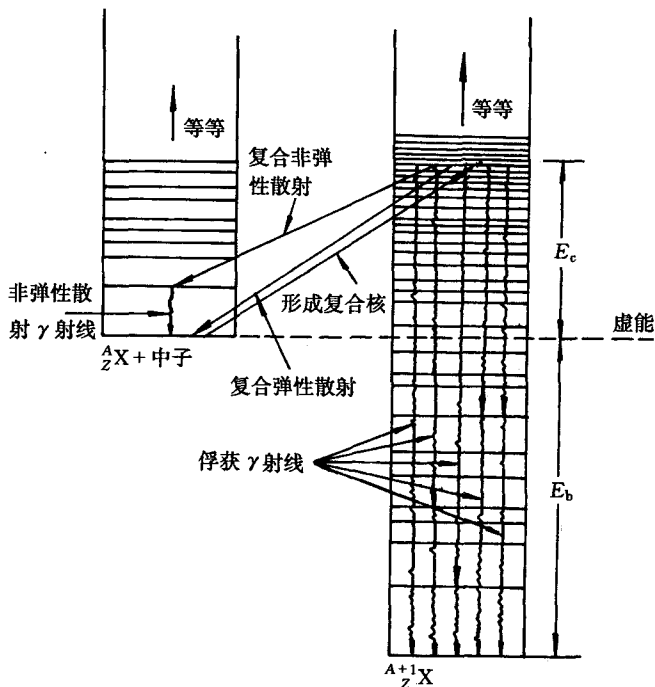
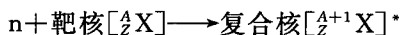


图 1-1 复合核的形成和衰变

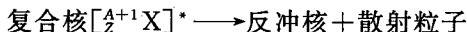
经过多次交换,使某一个核子得到足以逸出系统的能量时,处于激发态的复合核便通过放出一个粒子(或一个光子)而衰变,并留下一个余核(或反冲核)。

以上两个阶段可写成以下形式:

(1) 复合核的形成



(2) 复合核的衰变分解



这里 * 号表示复合核处于激发态。复合核的激发态衰变或分解有多种方式。若复合核放出一个质子而衰变,就称为(n, p)反应;放出 α 粒子的衰变称之为(n, α)反应。若放出的核子是一个中子,而余核 ${}^A_Z X$ 又重新直接回到基态,就称这个过程为共振弹性散射,简称(n, n)反应。如果放出中子后,而余核 ${}^A_Z X$ 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,简称(n, n')反应。复合核也可以通过发射 γ 射线而衰变,称这个过程为辐射俘获,简称(n, γ)反应。复合核一旦发射 γ 射线而衰变到束缚态时,它就不能再通过放出核子而衰变了。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某个量子能级时,中子被靶核吸收而形成复合核的概率就显著地增加,这种现象就叫作共振现象。这时,入射中子的能量就称为共振能。根据中子和靶核作用方式的不同,共振又可分为共振吸收和共振散射。共振吸收对反应堆的物理过程有着很大的影响。

综上所述,我们可以根据中子与靶核相互作用结果的不同,将中子与原子核的相互作用分为两大类:

- (1) 散射。包括弹性散射和非弹性散射。
- (2) 吸收。包括辐射俘获、核裂变、(n, α)和(n, p)反应等。

下面分别介绍这些核反应过程。



1.1.3 中子的散射

散射时入射粒子是中子,与靶核作用后放出的粒子依然是中子。散射是使中子慢化的主要核反应过程。它有非弹性散射和弹性散射两种。

1. 非弹性散射

当发生非弹性散射时,中子首先被靶核吸收而形成处于激发态的复合核,在这个过程中,入射中子把它的一部分动能(通常为绝大部分)转变成了靶核的内能,使靶核

处于激发态,然后靶核通过放出中子并发射 γ 射线而返回基态。因此,散射前后中子与靶核系统的动量守恒,但动能不守恒。在发生非弹性散射时,中子能量的损失是可观的,但并不是所有能量的中子都能发生非弹性散射,只有当入射中子的动能高于靶核的第一激发态的能量时才能使靶核激发,也就是说,只有入射中子的能量高于某一数值时才能发生非弹性散射,由此可知,非弹性散射具有阈能的特点。

表 1-1 列出了几种堆内常用元素核的前两个激发态的能量。从表中可以看出,轻核激发态的能量高,重核激发态的能量低。但即使对于像 ^{238}U 这样的重核,中子也至少必须具有 45 keV 以上的能量才能与之发生非弹性散射。因此,只有在快中子反应堆中,非弹性散射过程才是重要的。

表 1-1 几种核的前两个激发态的能量

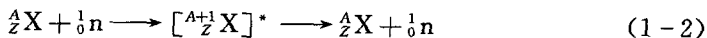
核	第一个激发态/MeV	第二个激发态/MeV
^{12}C	4.43	7.65
^{16}O	6.06	6.14
^{23}Na	0.45	2.0
^{27}Al	0.84	1.01
^{56}Fe	0.84	2.1
^{238}U	0.045	0.145

在热中子反应堆内由于裂变中子的能量在兆电子伏范围内,因此在高能中子区仍会发生一些非弹性散射现象。但是,中子能量很快降低到非弹性散射阈能以下后,便主要靠弹性散射来慢化中子了。

2. 弹性散射

弹性散射在中子的所有能量范围内都可能发生。它可分为共振弹性散射和势散射两种。前者经过复合核的形成过程,后者不经过复合核的形成过程。由于共振现象只对具有特定能量的入射中子才会产生,因此共振弹性散射也只对特定能量的中子才能发生。

弹性散射的一般反应式为



其中:(1-2)式为共振弹性散射,(1-3)式为势散射。

在弹性散射过程中,由于散射后靶核的内能没有变化,它仍保持在基态,散射前后中子-靶核系统的动能和动量是守恒的,所以可以把这一过程看作“弹性球”式的碰撞,根据动能和动量守恒,用经典力学的方法来处理(详见第 2 章)。

在热中子反应堆内,对中子从高能慢化到低能的过程起主要作用的是弹性散

射。

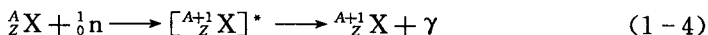


1.1.4 中子的吸收

由于吸收反应的结果是中子消失,因此它对反应堆内的中子平衡起着重要作用。中子吸收反应包括有 (n, γ) , (n, f) , (n, α) 和 (n, p) 反应等。

1. 辐射俘获 (n, γ)

辐射俘获是最常见的吸收反应。它的一般反应式为:



生成的核 ${}_{Z+1}^{A+1}X$ 是靶核的同位素,往往具有放射性。辐射俘获反应可以在所有的中子能区内发生,但低能中子与中等质量核、重核作用时易发生这种反应。例如,在堆内重要的俘获反应有:

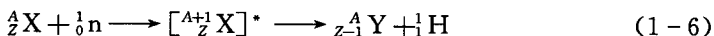


${}^{238}\text{U}$ 核吸收中子后生成 ${}^{239}\text{U}$, ${}^{239}\text{U}$ 经过两次 β^- 衰变可转变成 ${}^{239}\text{Pu}$ 。 ${}^{239}\text{Pu}$ 在自然界里是不存在的,它是一种人工易裂变材料。这一过程对核燃料的转换、增殖有重要的意义。

应该指出,在辐射俘获反应中,原先稳定的原子核通过俘获一个中子后,往往转变成了放射性的原子核,因此辐射俘获会产生放射性。这就给反应堆设备维护、三废处理、人员防护等带来了不少困难。

2. (n, p) 、 (n, α) 等反应

(n, p) 反应的一般反应式为:

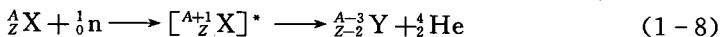


在反应堆运行过程中,堆内的冷却剂和慢化剂经高能中子照射后,将发生以下的核反应:



生成的 ${}^{16}\text{N}$ 每次衰变时放出三种高能的 γ 射线:7.12 MeV(5%),6.13 MeV(69%),2.75 MeV(1%),总产额为75%,是堆内水和重水系统放射性的重要来源。然而,由于 ${}^{16}\text{N}$ 的半衰期只有7.13 s,因此该反应并不会造成环境污染,也不会对检修造成危害。

(n, α) 反应的一般反应式为



例如,热中子与 ${}^{10}\text{B}$ 所发生的 (n, α) 反应为



在低能区,这个反应的截面很大,所以 ${}^{10}\text{B}$ 被广泛地用作热中子反应堆的反应性控