



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

核反应堆物理基础

曹欣荣 主编



原子能出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

核反应堆物理基础

曹欣荣 主编
曹欣荣 赵强 编写

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆物理基础 / 曹欣荣主编. —北京:
原子能出版社, 2010. 12
ISBN 978-7-5022-5137-6

I. ①核… II. ①曹… III. ①反应堆物理学 IV. ①TL32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 000191 号

内 容 简 介

本书从本科生的知识背景及学时安排出发,参考国内外同类教材,着重阐述反应堆物理的基本概念和基本理论,力求避免繁杂的数学推导,注意对学生学习兴趣的培养,并结合工程实际,简要介绍常用的反应堆理论分析方法。内容包括引言、反应堆中的核反应、中子扩散、慢化与反应堆临界理论、反应性的变化与控制、反应堆中子动力学、核反应堆物理数值计算方法、反应堆堆芯物理设计与燃料管理、反应堆物理启动试验等。

核反应堆物理基础

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 卫广刚

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 8.5 字 数 212 千字

版 次 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5137-6 定 价 32.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

本教材从本科生的知识背景及学时安排(48~56学时)出发,参考国内外同类教材(见参考文献),着重阐述反应堆物理的基本概念和基本理论,力求避免繁杂的数学推导,注意对学生学习兴趣的培养,并结合工程实际,简要介绍常用的反应堆理论分析方法。

为达到上述目的,本教材分为上下两篇,上篇作为入门主要包括反应堆物理基本概念和原理,下篇介绍了反应堆核设计和换料设计计算方法及反应堆物理启动知识。这样进行内容安排希望学生能够比较轻松入门,产生兴趣后,再继续深造。

本教材由曹欣荣教授主编,并承担第1章至第7章的编写,赵强副教授承担了第8章的编写。

本教材由清华大学施工教授审校,在出版过程中得到了原子能出版社的帮助,在此表示衷心感谢。

感谢在本教材编写过程中来自学生的建议和帮助。

由于编者学识的限制,书中难免出现疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2010年11月于哈尔滨工程大学

目 录

上 篇

第 1 章 引言	(1)
习题	(4)
第 2 章 反应堆中的核反应	(5)
2.1 中子核反应分类	(5)
2.2 中子核反应截面与核反应率	(7)
2.3 截面随中子能量的变化规律	(10)
2.4 核裂变	(12)
2.4.1 原子核的结合能与比结合能	(12)
2.4.2 裂变产物与裂变中子	(13)
2.4.3 裂变能量与反应堆功率	(16)
习题	(18)
第 3 章 中子扩散、慢化与反应堆临界理论	(19)
3.1 链式裂变反应与反应堆临界条件	(19)
3.2 中子慢化与慢化能谱	(22)
3.2.1 慢化物理机制	(22)
3.2.2 弹性散射过程	(22)
3.2.3 慢化剂的性质	(24)
3.2.4 反应堆能谱	(25)
3.3 中子扩散方程	(27)
3.3.1 中子流密度矢量与斐克定律	(28)
3.3.2 扩散方程	(31)
3.3.3 点源扩散	(33)
3.3.4 群扩散方法	(35)
3.3.5 点源扩散的二群计算	(37)
3.3.6 扩散长度、慢化长度、徙动长度	(39)

3.4	均匀反应堆的临界理论	(41)
3.4.1	均匀裸堆的单群扩散方程	(41)
3.4.2	均匀裸堆单群临界方程	(48)
3.4.3	有反射层均匀堆的单群临界理论	(51)
3.5	非均匀反应堆初步讨论	(55)
	习题	(56)
第4章	反应性的变化与控制	(58)
4.1	温度效应	(58)
4.1.1	反应性温度系数及其对核反应堆稳定性的影响	(58)
4.1.2	温度系数分类及其数量级	(59)
4.1.3	燃料温度系数-多普勒效应	(60)
4.1.4	慢化剂温度系数	(62)
4.1.5	其他反应性系数	(63)
4.2	中毒效应	(64)
4.2.1	^{135}Xe 中毒	(64)
4.2.2	^{149}Sm 中毒	(68)
4.3	燃耗	(69)
4.4	反应性控制	(74)
4.4.1	反应性控制的基本原理与方法	(75)
4.4.2	控制棒控制	(75)
4.4.3	化学补偿控制——载硼运行	(78)
4.4.4	可燃毒物控制	(78)
	习题	(79)
第5章	反应堆中子动力学	(80)
5.1	缓发中子的作用	(80)
5.2	点堆中子动力学方程	(82)
5.3	反应性阶跃变化时中子密度的响应	(85)
5.4	中子动力学应用举例	(87)
	习题	(88)

下 篇

第6章	核反应堆物理数值计算方法	(89)
6.1	中子输运方程	(89)
6.2	中子输运方程近似解法概述	(92)
6.2.1	能量变量的离散——多群方法	(93)
6.2.2	方向角变量的近似	(94)

6.2.3	空间变量的离散	(97)
6.2.4	小结	(101)
	习题	(101)
第7章	反应堆堆芯物理设计与燃料管理	(102)
7.1	反应堆设计的内容与步骤	(102)
7.1.1	反应堆设计的内容	(102)
7.1.2	反应堆设计的步骤	(102)
7.2	堆芯物理设计概述	(103)
7.3	堆芯物理设计计算方法	(105)
7.3.1	核数据库和多群常数库	(105)
7.3.2	均匀化少群常数计算	(109)
7.3.3	反应堆芯部功率分布计算	(111)
7.4	核电厂的燃料管理	(112)
7.4.1	相关概念	(112)
7.4.2	堆内核燃料管理的任务	(113)
7.4.3	堆芯换料方案	(115)
7.4.4	单循环燃料管理的堆芯核设计	(117)
	习题	(119)
第8章	反应堆物理启动试验	(120)
8.1	物理启动试验的目的和内容	(120)
8.2	反应堆的首次临界	(121)
8.2.1	外加中子源	(121)
8.2.2	反应堆临界试验基本原理	(122)
8.2.3	反应堆首次临界过程	(124)
8.3	反应性测量	(125)
8.3.1	反应性测量方法	(125)
8.3.2	反应性测量试验举例	(126)
	习题	(127)
参考文献		(128)

上 篇

第 1 章 引 言

目前,获得核能的主要途径是用中子轰击核燃料的原子核,使燃料核裂变释放出能量。

根据原子核裂变产生的能量计算,1 kg 核燃料 ^{235}U 完全裂变所产生的能量大约相当于 2 800 t 标准煤完全燃烧,或 2 100 t 燃油完全燃烧所产生的能量。造成如此巨大差别的原因是燃烧反应释放的是化学能,而化学反应前后原子核没有变化。

裂变反应堆

和平利用核能的重要装置是核反应堆,裂变反应堆是一种能以可控方式实现自续链式裂变反应的装置,本书主要讨论裂变反应堆的工作原理,而通过聚变反应获得核能的反应堆尚处于研究设计阶段。

裂变反应堆通常由核燃料、冷却剂、慢化剂、结构材料以及中子吸收材料组成。按引起裂变反应的中子能量不同,裂变反应堆分为热中子反应堆和快中子反应堆;按用途不同,裂变反应堆可分为生产堆、实验堆和动力堆;按慢化剂或冷却剂又可分为轻水堆、重水堆、气冷堆和钠冷快堆等。

压水堆核电站工作流程

裂变反应堆有多种类型,压水堆属热中子反应堆,是目前世界上应用最广泛的反应堆堆型,在已建成的核电站中,压水堆占 60% 以上。为了把反应堆的水温提高到 300 °C 左右而不致沸腾,必须把压力提高到 14~16 MPa,并需要一个耐受高压的容器即压力容器来放置堆芯,这种堆型称为加压力水慢化冷却反应堆,简称压水堆。图 1-1 为压水堆核电站工作原理示意图,从图中可以初步了解反应堆在整个核电站中的作用。

压水堆核电站采用稍加浓缩铀作核燃料,燃料芯块中 ^{235}U 的富集度约 3%,其余为同位素 ^{238}U (天然铀矿中 ^{235}U 约占 0.7%),核燃料是高温烧结的圆柱形二氧化铀陶瓷燃料芯块。柱状燃料芯块被封装在细长的锆合金包壳管中构成燃料元件,这些燃料元件以矩形点阵排列为燃料组件,组件横断面边长约 20 cm,长约 3 m。近两百个组件组装成压水堆的堆芯,堆芯呈圆柱形(见图 1-2、图 1-3)。反应堆启动后,大量裂变反应发生,放出的能量使燃料温度升高。

在压水堆中轻水作冷却剂,也兼作中子的慢化剂。轻水流经堆芯,及时带走堆芯产生的核能,使燃料不会由于温度过高被损坏熔化。轻水有一个明显的缺点,就是沸点低。要使热

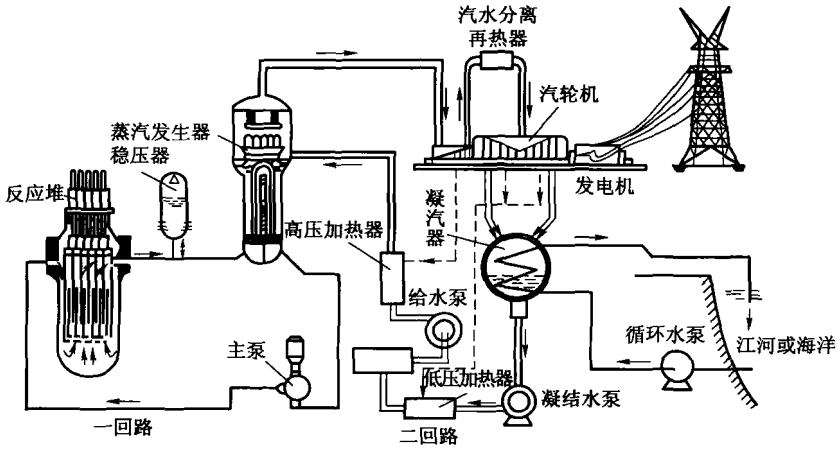


图 1-1 压水堆核电站工作原理示意图

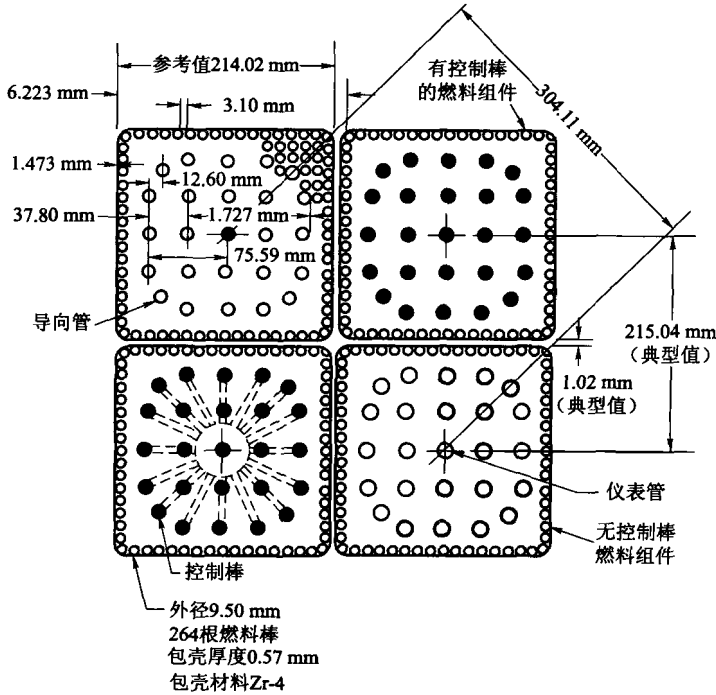


图 1-2 燃料组件

能系统有较高的热能转换效率,根据热力学原理,核反应堆应有高的堆芯出口温度;要获得高的温度参数,就必须增加冷却剂的系统压力使其处于液相状态。压水堆冷却剂入口水温一般在 290 °C 左右,出口水温 330 °C 左右。

高温水从压力容器上部离开反应堆堆芯以后,进入蒸汽发生器。冷却剂从蒸汽发生器的管内流过后,经过冷却剂回路循环泵又回到反应堆堆芯。由压力容器、蒸汽发生器、主泵、稳压器及有关阀门构成的系统称为一回路,是冷却剂回路的压力边界。它们都被安置在安全壳内,称为核岛。

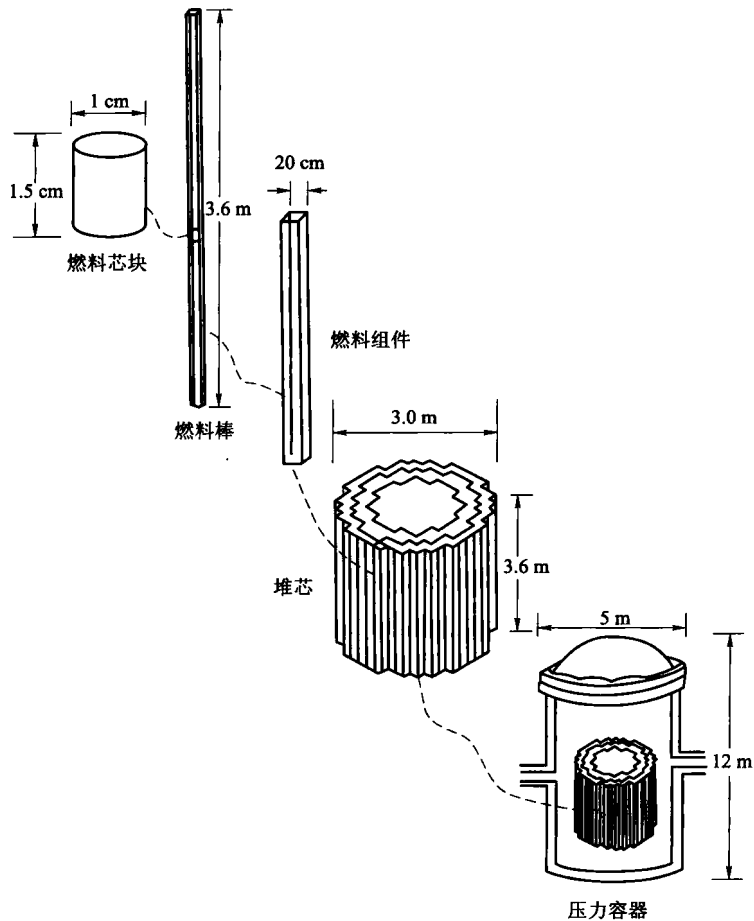


图 1-3 堆芯组成

蒸汽发生器内有很多传热管，一回路和二回路通过蒸汽发生器传递热量。传热管外为二回路的水，一回路的水在蒸汽发生器传热管内流动时，将携带的热量传输给二回路内流动的水，从而使二回路的水变成 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右、 $6\sim 7\text{ MPa}$ 的高温蒸汽。所以在蒸汽发生器里，一回路与二回路的水在互不交混的情况下，通过管壁发生了热交换。蒸汽发生器是分隔一回路和二回路的关键设备。

从蒸汽发生器产生的高温蒸汽，流过汽轮机，带动发电机组发电。余下的大部分不能利用的能量交给冷凝器，排放到最终热阱——江、河、湖、海或大气。

反应堆物理主要研究内容

本书以压水堆堆芯为研究对象，介绍核能产生的物理过程、反应堆运行的物理原理及反应堆核设计的基本概念和方法。

由于每次裂变能够放出 $2\sim 3$ 个中子，反应堆内有大量中子存在，压水堆中典型的中子密度值约为 10^{16} 中子/ m^3 ，各类介质原子核密度约为 10^{28} 原子核/ m^3 ，核反应堆中的主要核过程是大量中子与堆内各种原子核的相互作用。对一个中子来讲，它是以杂乱无章的折线轨迹在介质内进行随机运动的，并与各类介质原子核发生相互作用，直到它被吸收或从反应

堆表面逸出为止。这是一个随机的过程,我们无法跟踪反应堆内每个中子的路径及其经历的物理过程,但可以确定各类核反应发生的概率,从而确定空间不同点处中子数目的宏观分布及核反应发生的次数,并根据每次裂变释放的平均能量,确定反应堆的功率分布及功率水平。反应堆物理要解决的核心问题是确定反应堆内中子数目的分布。

习 题

1. 什么是裂变反应堆? 裂变反应堆通常如何进行分类?
2. 简述压水堆核电站工作流程。

第 2 章 反应堆中的核反应

本章主要介绍反应堆内中子与原子核的反应类型及裂变反应过程,从微观层面探讨核能的本质。

2.1 中子核反应分类

在反应堆内中子与燃料核、慢化剂核以及结构材料核相互作用发生核反应。设入射粒子为 a , 被轰击的核即靶核(通常假设它是静止的)为 A , 生成核及出射粒子分别为 B 及 b , 反应过程可表示为 $A(a, b)B$ 或



根据反应后发射粒子的不同,中子核反应可以分为以下几类,见图 2-1。

散射

这类反应的特点是入射粒子是中子,出射粒子也是中子。

(1) 中子与原子核发生弹性散射,即 (n, n) 反应。

中子与靶核作用后,靶核内能不变,因此反应前后除动量守恒外,动能也守恒。中子在慢化剂原子核上多次碰撞后,动能减少,这就是反应堆内主要的中子慢化过程。

(2) 中子与原子核发生非弹性散射,即 (n, n') 反应。原子核俘获中子后处于不稳定状态,然后放出动能较小的中子,但原子核仍处于激发态,把它多余的能量以 γ 射线形式放出后,才回到基态。非弹性散射反应也可以使中子的能量减小,从而达到慢化的目的。

吸收

这类反应的特点是入射粒子是中子,反应后中子消失。

(1) 吸收中子放出 γ 射线反应称为辐射俘获反应,即 (n, γ) 反应。例如 ^{238}U 在反应堆内受中子辐照后产生 (n, γ) 反应,例如:



^{239}U 还会衰变,经两次 β^- 衰变转变成 ^{239}Pu 。

(2) 吸收中子放出带电粒子的反应,如 (n, α) 反应,反应堆中作为控制材料的 B , 吸收中子后放出 α 粒子,并形成新核 Li :



又如 (n, p) 反应,压水堆一回路中的水历经堆芯时,水中的 ^{16}O 核吸收中子后放出一个质子:

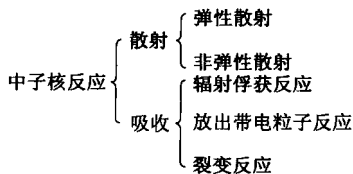
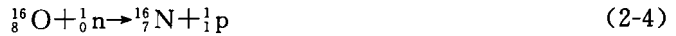


图 2-1 中子核反应分类

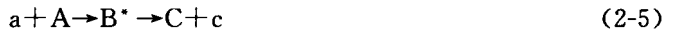


这些反应所生成的核并不稳定,要发生放射性衰变。例如 ${}^{16}\text{N}$ 要发生 β 衰变同时放出高能量的 γ 射线,是堆内一回路水放射性的重要来源。

(3) 吸收中子发生原子核裂变,即(n,f)反应。如 ${}^{235}\text{U}$ 的原子核吸收中子后发生裂变,使原子核分裂成两个碎片,并放出大量能量,同时放出中子。这一过程放出的能量就是核反应堆利用的核能(详见本章2.4节)。

复合核模型

热中子反应堆内发生的核反应,除了势散射(弹性散射分为复合弹性散射和势散射两种),基本上都可用复合核模型来解释。由原子核物理可知,该模型认为核反应存在一个复合核的中间阶段。首先,入射粒子a与靶核A形成一个复合核,该复合核一般处在激发态上,用 B^* 表示;之后,复合核衰变形成新核C并放出一个其他粒子c。其过程可表为:



我们仍研究中子核反应。令靶核为 AZ ,开始是静止的。首先中子向靶核接近形成复合核 ${}^{A+1}Z^*$,其激发能即等于 $E_c + E_b$,其中, E_b 为中子和靶核形成复合核时产生的结合能, E_c 为入射粒子部分动能转化成的复合核的内能。

按照量子理论,核的激发能态可用一系列分立的能级来表示,复合核一般将处在基态以上 $E_c + E_b$ 附近的某一激发能级上,如图2-2所示。其中,原子核被激发时通常可以使核内几个核子同时激发起来,激发能可分配给核内不同核子。当中子和靶核形成复合核而把能量带入后,这份能量即开始在复合核内所有的核子间进行分配或集中。这个统计过程便是复合核的相对稳定阶段。

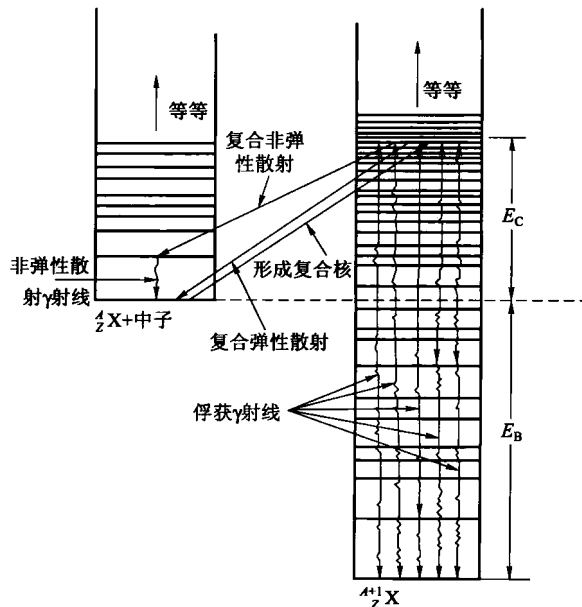
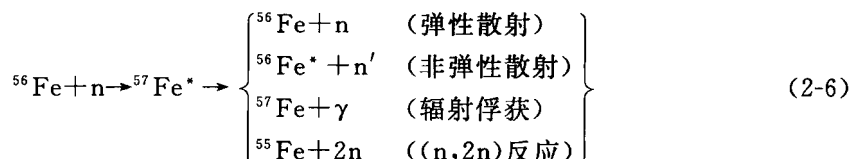


图 2-2 复合核的形成和衰变

核反应的第二个阶段是复合核的衰变阶段。当复合核内某一核子或一组核子,在与其他核子的统计性碰撞中获得的能量大于一定值以后,就会有粒子被复合核放射出来。在这

一个衰变过程中,复合核可以重新放出一个中子,也可以放出质子、 α 粒子或只发射一个或几个 γ 光子。如果放出一个中子而剩下的核又回到了基态,这就是中子复合弹性散射,以与势散射相区分。如果放出中子后剩余核仍处在激发态上,这个过程即是非弹性散射。如果只放出 γ 射线,这就是 (n, γ) 辐射俘获反应。图 2-2 中已画出了与这几种反应相应的过程。例如能量为 10 MeV 左右的中子轰击 ^{56}Fe 靶,先形成复合核 $^{57}\text{Fe}^*$; $^{57}\text{Fe}^*$ 可以有几种不同的衰变方式:



2.2 中子核反应截面与核反应率

为了定量说明以上核反应的概率大小,通常引进“反应截面”的概念。

微观截面

考虑一均匀且速度单一的平行中子束,垂直投射到薄的靶片上。为方便起见,设该靶片面积为 1 cm^2 , 靶片原子数密度为 N (原子/ cm^3)。令投射到靶片内 x 处厚度为 dx 薄层上的中子束的强度为 $I(x)$ 中子/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, 中子束强度即为单位时间通过与中子束垂直的单位面积的中子数。通过 dx 时,由于发生了某类核反应,中子束的强度减少量为 $-dI$ (见图 2-3)。实验指出, $-dI$ 与中子束强度 I 、靶片原子数密度 N 以及靶片厚度 dx 成正比:

$$-dI = \sigma IN dx \quad (2-7)$$

式中, σ 为比例常数。式(2-7)可改写为:

$$\sigma N dx = -\frac{dI}{I} \quad (2-8)$$

按定义, I 为单位时间投射到靶层上的中子数, $-dI$ 为 dx 靶层中每秒发生的反应次数,所以式(2-8)右端即为中子束内一个中子与 dx 层内的靶核发生反应的几率。又因 $N dx$ 为 dx 层内的靶原子数,故 σ 即为靶层中一个靶核与束内一个中子发生某类反应的几率;由式(2-8)可知, σ 有面积的量纲,所以 σ 可称为发生某类反应的微观截面。微观截面单位是靶(b), $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。

同一种原子核和中子发生不同核反应时,其微观截面值也有很大差别。所以,尽管微观截面是以面积为单位来表示,但微观截面并不是原子核的几何面积。有时截面比几何面积小,有时截面要比几何面积大得多。例如,碳核的吸收截面约为它的几何面积的千分之一,而氙核的吸收截面却比它的几何面积大一百万倍左右。

不同类型的反应概率,可用不同的微观截面来描述。弹性散射、非弹性散射的概率分别用微观弹性散射截面 σ_e 及微观非弹性散射截面 σ_{ie} 来描述,它们之和称为微观散射截面:

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_{ie} \quad (2-9)$$

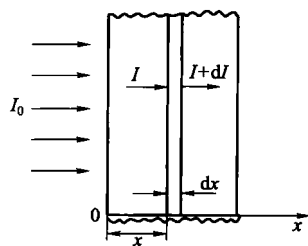


图 2-3 平行中子束的衰减

辐射俘获(n, γ)反应概率用微观辐射俘获截面 σ_γ 描述; (n, α)、(n, p)等反应的概率分别用 σ_α 、 σ_p 来描述; 裂变反应(n, f)概率用 σ_f 来描述等等。

各种吸收中子的微观截面之和, 称为微观吸收截面 σ_a , 即:

$$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_\alpha + \sigma_p + \dots \quad (2-10)$$

在压水堆内, 燃料核吸收中子时主要是发生裂变或辐射俘获, 故其微观吸收截面主要由式(2-10)等号右端前两项决定。

所有反应截面之和, 称为微观总截面 σ_t :

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (2-11)$$

或

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_{ie} + \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_\alpha + \sigma_p + \dots \quad (2-12)$$

应该注意的是, 以上讨论中已假定了发生核反应时靶核间是互相独立的。

宏观截面

对式(2-7)积分, 得:

$$I = I_0 e^{-\sigma N x} \quad (2-13)$$

式中, I_0 为垂直投射到靶片表面上的入射中子束初始强度, I 为经过厚度 x 后的强度。式(2-7)或式(2-13)中的 σ 及 N , 常以乘积的形式一起出现, 令:

$$\Sigma = \sigma N \quad (2-14)$$

则按 σ 的概率意义, Σ 即为一个中子与单位体积靶物质内的原子核发生某类反应的几率, 或总的有效截面, 故称其为宏观反应截面。 Σ 还有另一层物理意义, 利用式(2-14)、式(2-8)可写为:

$$\Sigma dx = -\frac{dI}{I} \quad (2-15)$$

按上面所述, 式(2-15)右端即为中子穿入靶内 x 处未发生某类反应而在 $x \rightarrow x + dx$ 内发生该类反应的几率, 即 Σdx 为中子在 dx 路程上与靶核发生某类反应的几率。故 Σ 即表示在介质(靶)内的单位程长上中子与靶核发生某类反应的几率。由式(2-14)可知, Σ 有长度倒数的量纲, 以 $1/\text{cm}$ 为单位。

对不同的反应过程, 可定义不同的宏观截面。如 $\Sigma_a = N\sigma_a$ 为宏观吸收截面, $\Sigma_f = N\sigma_f$ 为宏观裂变截面等。

现对 Σ 的计算再作两点简单讨论。

如果靶物质由同一种元素所组成, 令原子量或摩尔质量为 $A(\text{g/mol})$, 密度为 $\rho(\text{g/cm}^3)$, 则每立方厘米的原子数为 $\frac{\rho}{A}(\text{mol/cm}^3)$ 。又因为每 1 mol 的原子数为阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 原子/摩尔, 故该物质的原子密度为:

$$N = \frac{\rho}{A} N_A \quad (\text{原子/cm}^3) \quad (2-16)$$

而

$$\Sigma = \frac{\rho}{A} N_A \sigma \quad (1/\text{cm}) \quad (2-17)$$

如果靶物质由 X 和 Y 两种元素的均匀混合物组成, 每立方厘米内原子数分别为 N_X 和 N_Y , 微观截面分别为 σ_X 和 σ_Y , 那么在 X 与 Y 互相独立的情况下, 总的宏观截面即为:

$$\Sigma = \Sigma_X + \Sigma_Y = N_X \sigma_X + N_Y \sigma_Y \quad (2-18)$$

式中, Σ_X 、 Σ_Y 及 Σ 分别表示单位程长上中子与 X 核、Y 核以及中子与 X 和 Y 核发生作用的概率。

如果靶物质由上述两元素的化合物所组成, 其分子式为 $X_m Y_n$, 则一个分子(共 $m+n$ 个原子)的截面为:

$$\sigma = m\sigma_X + n\sigma_Y \quad (2-19)$$

平均自由程

中子在相继两次相互作用间所穿行的距离称为自由程, 其平均值称为平均自由程, 记作 λ 。不同过程与不同平均自由程相对应, 后者与相应的宏观截面有简单的倒数关系。例如散射平均自由程 λ_s , 即指一个中子平均走 λ_s 后才发生一次散射碰撞, 故:

$$\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s} \quad (2-20)$$

令中子平均速度为 v , 则单位时间内中子与介质核发生散射碰撞的平均次数为 v/λ_s , 但因 Σ_s 为单位程长上的散射概率, 而单位时间内中子的平均碰撞次数也可写为 $\Sigma_s v$, 故有 $v/\lambda_s = \Sigma_s v$, 从而可得到式(2-20)。

同理, 吸收平均自由程 λ_a (一个中子平均走 λ_a 的距离时被吸收) 与宏观吸收截面 Σ_a 也有倒数关系:

$$\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a} \quad (2-21)$$

中子核反应率

单位时间单位体积介质内中子与核发生反应的次数称为中子核反应率, 常用 R 表示。设中子以相同的速率 v 在介质内杂乱无章地运动, n 为单位体积内的中子数即中子密度, Σ 为一个中子与单位体积介质中的原子核发生某类核反应的概率, 则 Σv 为单位时间内一个中子与介质核发生某类核反应的统计平均次数, 而 $\Sigma n v$ 为单位体积单位时间内中子与介质核发生某类核反应的统计平均总次数, 即:

$$R = \Sigma n v \quad (2-22)$$

在反应堆理论中, 常出现 $n v$ 这个积, 称:

$$\phi = n v \quad (2-23)$$

为中子通量密度, 其单位为中子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。故:

$$R = \Sigma \phi \quad (2-24)$$

即中子与介质核发生某类相互作用的反应率由宏观截面及中子通量密度乘积决定。式(2-23)给出了中子通量密度的物理意义。式(2-23)表示: 某点中子通量密度等于该点中子密度与中子速率的乘积, 是个标量, 与中子运动的方向无关。在上述讨论中, 假设介质内所有中子的速率都是相同的。这种单能中子的问题, 是最简单的情况。

需要注意, 不同类型的中子核反应率, 应与不同类型的宏观截面对应。例如热中子引起的 ^{235}U 的裂变反应率等于 $\Sigma_f \phi$, 其中 Σ_f 为 ^{235}U 的热中子宏观裂变截面, ϕ 为热中子通量密度。热中子被吸收的反应率等于 $\Sigma_a \phi$, 其中 Σ_a 为介质对热中子的宏观吸收截面等。

2.3 截面随中子能量的变化规律

核反应中的共振现象

由前面讨论的复合核模型可知,复合核形成过程与入射中子能量 E 以及靶核的具体特点有关。量子力学证明,当 E 能使复合核的能量非常接近或正好等于它的某激发能级值时,则形成该复合核的概率特别大(共振);反之这个概率就小得多。能量为 E 的中子与靶核作用后放出粒子 i 这种反应的截面 $\sigma_i(E)$,可用形成复合核的截面 $\sigma_{CN}(E)$ 与复合核相对衰变概率 w_i 的乘积来表示,即:

$$\sigma_i(E) = \sigma_{CN}(E)w_i \quad (2-25)$$

式中, i 为中子核反应放出的粒子种类。

一般说来, $\sigma_i(E)$ 随能量 E 变化的关系比较复杂,但在一个孤立的能级附近,可以证明 $\sigma_i(E)$ 与 E 基本上满足如下的关系:

$$\sigma_i(E) \propto \frac{w_i}{(E - E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (2-26)$$

式中, E_r 为发生共振的中子能量值; Γ 为与复合核总衰变概率成正比的一个量,称为总能级宽度。式(2-26)表明当中子能量 E 具有某值 E_r 时, $\sigma_i(E)$ 达到极大值,有共振的特点,如中子共振吸收现象(见图 2-4)。

截面随中子能量的变化规律

各类反应的概率或微观截面,在不同入射中子能量以及不同靶核质量数的情况下,差别是比较大的。但反应堆内发生的几个最重要的反应,如辐射俘获(n, γ)反应以及重核裂变(n, f)反应等,它们的反应截面大体上都可按入射中子能量 E 的大小分成 3 个区域。在低能区内(一般指中子能量 $E \leq 1$ eV),又称热中子区,反应

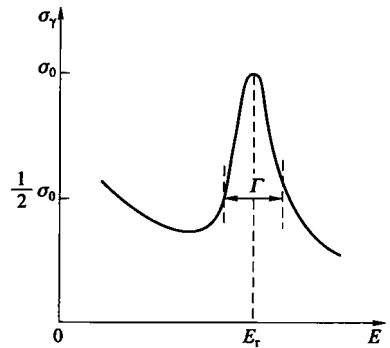


图 2-4 中子吸收共振峰

截面与 $\frac{1}{\sqrt{E}}$ 或 $\frac{1}{v}$ 成正比,该能区称为 $\frac{1}{v}$ 区。在中能区(1 eV $< E \leq 1$ keV),又称共振区,当中

子能量等于某些特定值时,反应截面有极大值,出现了共振峰,否则截面相对较小。在高能区($E > 1$ keV),又称快中子区,由于原子核能级分布较密集,截面的共振峰互相重叠不再能够分辨,反应截面都较小,因此 σ 随 E 的变化虽仍有一定起伏,但是变得平滑了。下面介绍几类重要中子反应截面的变化特点。

(1) 弹性散射

许多核(特别是轻核)与低能区的中子的相互作用,主要是弹性散射,这时入射中子并不与靶核形成复合核,弹性散射是个势散射过程。势散射的反应截面 σ_e 基本上为一常数,其值由核半径 R 决定:

$$\sigma_e = 4\pi R^2 \quad (2-27)$$

在 σ_e 为常数的能区之上为共振区, σ_e 随 E 的变化有明显的共振峰出现,这时可用复合