

2

核工程丛书

核反应堆理论

J. J. 赛里特著 刘圣康译

核 工 程 丛 书 (2)

核 反 应 堆 理 論

J. J. 賽里特 著

刘 圣 康 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书系“核工程丛书”的第二册,书中扼要地介绍了有关核反应堆的物理问题,主要内容包括:核链式反应,热中子的扩散,中子的减速,临界大小的计算,栅格计算,反应堆在功率状况下工作以及反应堆和燃料循环的类型等。本书适宜于学习核工程的学生及从事原子能工作的读者阅读。

Nuclear Engineering Monographs
NUCLEAR REACTOR THEORY

J. J. Syrett

Temple Press Limited

核工程丛书(2)

核反应堆理论

刘圣康译

上海科学技术出版社出版(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可登记证093号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本850×1168 1/32 印张3 6/32 排版字数77,000

1964年5月第1版 1964年5月第1次印刷

印数1-2,000

统一书号 13119.568 定价(十二) 0.50 元

序

根据英国和国外建立核动力的计划看来，核能的利用正在日益增长。本书的目的是对反应堆设计方面提供一般的物理学知识。它是根据在曼彻斯特大学机械工程系所开设的课程中对工程师和物理学家所作的一系列讲演写成的。

虽然已经尽力使本书的内容着重物理概念，而不着重数学推导，但是读者必须具备读到初等微积分为止的一些数学知识。此外，还假定读者已经具有核物理的某些基础知识。本书对反应堆内的中子行为作了一般说明以后，就指出如何把这些概念列出数学公式，以便为反应堆的物理设计提供定量的数据。书中没有讨论核反应堆的控制和一般的动力学行为，因为这些属于本丛书其他分册的内容。本书特别着重于叙述以气体作为冷却剂、天然铀作为燃料以及石墨作为减速剂的反应堆（它是英国核动力计划的基础），但是所讨论的问题是可以供一般应用的。最后一章对反应堆可能发展的前途作了简略的说明。

希望本书能达到这样的目的，即为大学和专科学校的学生、科学家和工程师提供有关反应堆设计中一些重要的物理问题的基础知识。

J. J. 赛里特

哈威尔原子能研究所

1958年2月

符 号

A = 原子量

a = 球或圆柱体的半径

a = 铀棒的半径

a_0 = 外推的活性区半径

B^2 = 曲率(或拉普拉斯算符)

b = 中子散射角的平均余弦

b = 栅格单元的折合半径

C_0 = 初始转换因数

c = 围绕燃料的冷却隙缝的外部半径

D = 扩散系数

E = 中子能量

E_0 = 相当于速度为 2200 米/秒的中子能量(即 0.0253 电子伏)

f_5 = ^{235}U 的热中子利用因数

H = 圆柱形活性区的高度

J_0 = 第一类零级贝塞尔函数

j_x = 在 x 方向的中子流的分量

k = 玻耳兹曼常数

k_{eff} = 有效再生常数

k_{∞} = 无限大介质的再生常数

L = 热中子扩散长度

L_s = 中子减速长度

l = 中子平均自由程

M = 中子徙动长度

MWD = 兆瓦日能量

N = 每立方厘米原子数

N_f = 中子在减速过程中所作的碰撞次数的平均数

n = 中子密度 (每立方厘米中子数)

P = 裂变中子在燃料棒中的碰撞几率

p = 逃脱共振几率

r = 在极坐标中的径向距离

S = 中子源强度 (每秒每立方厘米中子数)

T = 以 $^{\circ}\text{K}$ 为单位的温度

T_M = 以 $^{\circ}\text{K}$ 为单位的减速剂温度

T_e = 外推反射层厚度

V = 体积

v = 中子速度

z = 在圆柱形坐标中的轴向距离

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$$

δ = 反射层节省

ϵ = 快中子裂变因数

η = 在裂变材料中每吸收一个中子所产生的平均中子数

θ = 中子散射角 (在实验室参照系中)

κ = 中子扩散长度的倒数 (即 L^{-1})

A = 中子不泄漏几率 ($= A_f A_t$)

A_f = 快中子不泄漏几率

A_t = 热中子不泄漏几率

λ = 线性外推长度

λ = 超热中子通量对热中子通量的比率

ξ = 每次碰撞的平均对数能量减缩

ρ = 密度 (克·厘米 $^{-3}$)

ρ = 反应性 (活性)

Σ = 宏观截面 ($= N\sigma$)

Σ_{12} = 双组理论的宏观减速截面

σ = 微观截面

$\hat{\sigma}$ = 约化到 2200 米/秒的 (威斯特柯脱转换) 微观截面

ϕ = 中子通量

$\bar{\phi}$ = 在一个区域中的平均中子通量

$\hat{\phi}$ = 约化到 2200 米/秒的 (威斯特柯脱转换) 中子通量

ψ = 中子散射角 (在质心参照系中)

脚 标

a = 吸收

O = 活性区

O = 管套

c = 辐射俘获

e = 超热 (中子) 的

eff = 有效的

f = 裂变

M = 减速剂

R = 反射层

s = 散射

th = 热 (中子) 的

tot = 总的

tr = 迁移

U = 铀

0 = 2200 米/秒

1, 2 = 快 (中子) 组, 热 (中子) 组

5, 8 = ^{235}U , ^{238}U

目 录

序

符 号

第一章 核鏈式反应	1
第二章 热中子的扩散	13
第三章 中子的减速	26
第四章 临界大小的計算	35
第五章 栅格計算	55
第六章 在功率状况下的反应堆运轉	68
第七章 反应堆和燃料循环的类型	76
附录一 热中子反应堆截面的平均	81
附录二 热中子反应堆中的超热吸收	85
参考文献	89
索 引	92

第一章 核鏈式反应

核 动 力

核反应堆是一种使原子核进行自續核反应来产生能量的装置.在本书中,我們只考虑分裂重核来产生能量的裂变反应堆.利用聚合很輕的核成为較重的核来产生能量的聚变反应堆(或者称为热核反应堆)虽然在原理上也是可能的,但这种反应堆要在将来才能够变成事实.

由核反应所产生的大部分能量是以热的形式出現的,在典型的产生动力的反应堆中,这种热量是由冷却剂带出的.

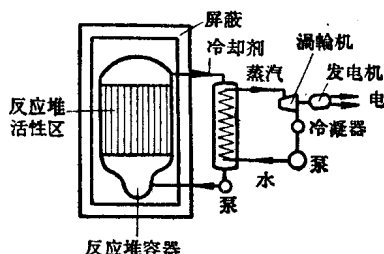


图1 动力反应堆

冷却剂通至热交换器中将热傳給水.水受热后轉变为蒸汽,然后被輸送至普通的蒸汽渦輪机中使之发电.图1簡略地表明了这个过程.由图中可以看出,核反应堆已經被用来代替普通发电站中燃燒煤或燃燒油的炉子.

核 裂 变

1938年,哈恩和斯特劳斯曼已經指出:一个重核能够吸收一个中子而进行裂变,也就是說,它可以分裂为二个較輕的核(裂变产物).裂变过程具有二个非常重要的特征.首先,在这个反应中存在着质量損失(也就是說,最后产物的总质量比原先的核和中子的总质量小).质量与能量相当是爱因斯坦狭义相对論的一个結論,所以,这个质量亏损必然以能量的形式出現.其次,在核反应中,

釋放能量是很平常的，但是裂變與其他核反應不同之點是：平均每次裂變會產生 1 個以上的新的中子。在一定的條件下，這些第二代中子能夠引起進一步的裂變，這樣就發生了鏈式反應。此外，裂變不同於其他許多核反應是它可以繼續產生能量。

在足夠快的中子的轰擊下，所有的重核都可以發生裂變。但是，1939 年玻爾 (Bohr) 和惠勒 (Wheeler) 預言：只有包含奇數個中子的非常重的原子核才能被具有各種動能 (直至動能為零) 的中子引起裂變。滿足這個條件而天然存在的唯一的核就是 ^{235}U ，它包含有 92 個質子和 143 個中子。天然的 ^{235}U 只存在於天然鈾中。在天然鈾中，它與化學性質相同的材料 ^{238}U 混合在一起，它們的比例大約是：1 個 ^{235}U 原子對 138 個 ^{238}U 原子 (即占重量的 0.71%)。所以，只有一小部分天然鈾才能被低能中子所裂變。因為 ^{235}U 和 ^{238}U 的化學性質相同，天然鈾中較為有用的部分 (^{235}U) 只能借助於非常精細的物理過程來分離 (例如：利用由於 ^{235}U 和 ^{238}U 的氣體化合物密度上微小的差別所引起的擴散率很小的差別)，因此需要建立起龐大的設備和消耗大量的功率。

雖然 ^{235}U 是一種很容易被慢中子引起裂變的唯一的天然存在的材料，但是可以在核反應堆中人工地製備其他的一些裂變材料，例如：由 ^{238}U 製成 ^{239}Pu ，由 ^{232}Th 製成 ^{233}U 。

當一個 ^{235}U 核發生裂變後，平均說來，大約產生 200 兆電子伏^[1] 的能量和 2.5 個中子。所以一次裂變能夠釋放出 3.2×10^{-11} 瓦·秒的能量，也就是說，每秒 3.1×10^{10} 次裂變會產生相當於 1 瓦的功率。因為一個 ^{235}U 原子的重量大約是 3.90×10^{-22} 克，所以，假如 1 克 ^{235}U 完全被裂變，那末所產生能量是 8.2×10^{10} 瓦·秒 = 0.95 兆瓦日。因而近似地有：

[1] 電子伏是核物理中常用的一個能量單位。

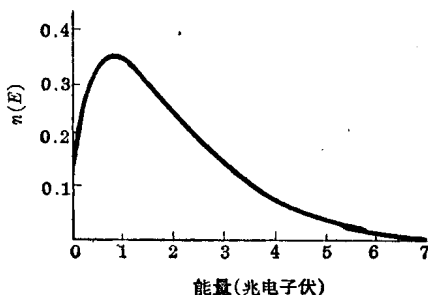
1 兆電子伏 = 10^6 電子伏 = 1.60×10^{-6} 爾格

= 1.60×10^{-12} 瓦·秒 = 1.52×10^{-16} 英國熱量單位。

1 克裂变材料 $\equiv$ 1 兆瓦日的热量。

为了比較起見，可以举出燃燒 1 吨煤所产生的热量大約是 0.36 兆瓦日。这就是說，1 吨鈾完全被裂变时所产生的热量相当于 2.7×10^6 吨煤所产生的热量。

由裂变所产生的中子具有一个能量的分布，实验发现这个分布适合于如图



2 所示的经验表示式：

图 2 裂变中子的能量分布

$n(E)dE = Ae^{-E} \sinh \sqrt{2E} dE$ (E 以兆电子伏为单位)，
这里， $n(E)dE$ 是具有能量为 E 到 $E+dE$ (兆电子伏) 范围内的中子部分。对这个表示式积分后得出：

$$A = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} = 0.484,$$

并且由裂变所产生的中子的平均能量为 $E_f = 2.0$ 兆电子伏。

裂变鏈式反应

一个中子能够引起一次裂变，这个裂变会产生一个以上的第二代中子；这些第二代中子也具有引起裂变的机会，因此就可能产生鏈式反应。假如，平均說来，由裂变所产生的的每一个中子恰好能够产生一个下一代的中子，那末就建立了稳定的鏈式反应，并且将产生稳定的功率。这样的系統称为临界系統。然而，假如平均每一个中子产生多于或少于一个下一代的中子，那末功率将或者是无限地增大或者是减小到零。（对于功率无限地增大的系統称为超临界系統，其反应称为发散反应；对于功率减小到零的系統称为次临界系統，其反应称为收敛反应。）

由裂变所产生的中子的可能命运是：

- (1) 引起下一次裂变。
- (2) 被裂变材料吸收(辐射俘获)而不引起裂变。
- (3) 被其他材料吸收(辐射俘获)。
- (4) 从系统的边界上泄漏。

泄漏的几率与系统的大小有关,对于无限大系统,它等于零。因此,假如在一个无限大系统内可能出现发散的链式反应,那末对于给定的几何形状将有一个特定的大小,它的泄漏恰好足够维持一个稳定的链式反应。这一大小通常称为系统的临界大小。

反应堆物理的基本任务是决定在何种条件下能够发生临界的链式反应,以及合适的临界大小是多少。我们首先考虑在何种条件下在一个无限大系统内可能出现发散的链式反应,因为只有这样,有限系统才有可能达到临界。

快中子反应

首先考虑一块纯铀,而且暂时只考虑 ^{238}U 。它具有随着入射中子的能量而发生变化的裂变截面^[1],如图3所示。从图中可以看到能量低于大约1兆电子伏的中子不能在 ^{238}U 中引起裂变。

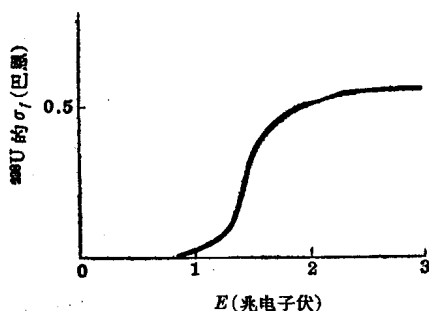


图3 ^{238}U 的裂变截面

考虑能量约为2兆电子伏的裂变中子。它的可能命运是:

- (1) 非弹性散射——引起能量的损失。
- (2) 辐射俘获——被吸收而不引起裂变。
- (3) 裂变。

在能量约为2兆电子伏处,裂变截面大于辐射俘获截面,所以可以

[1] 核的截面是用来量度特定核反应的几率的,关于这方面将在第二章中予以讨论。通常用符号 σ 来表示截面,并且用 10^{-24} 厘米²(或巴恩)作为单位来量度。

期望在 ^{238}U 中維持一个快中子鏈式反应。然而,由于非彈性散射的几率較裂变几率大得多,因而中子的能量迅速地降至 ^{238}U 的裂变閾以下,并且因裂变而增加的中子数目是很少的。然后,这些中子被 ^{238}U 俘获,因而不能完成发散的鏈式反应。

在天然鈾中,存在着一些 ^{235}U , 而且在所有的能量处,它具有比 ^{238}U 为更大的裂变截面。然而,較大的裂变截面还不足以补偿 ^{235}U 很低的濃度,中子仍由于非彈性散射而降至共振能量。 ^{238}U 对具有共振能量的中子的俘获几率是非常大的(較之由于存在少量 ^{235}U 而引起裂变的几率更大),因而正如在 ^{238}U 中那样,在天然鈾中也不能完成发散的鏈式反应。

虽然发散的鏈式反应不可能在純 ^{238}U 或者天然鈾中完成,但是却可以在純裂变材料或者高濃縮度鈾(所含的 ^{235}U 約在10%以上)中完成,因为这时快中子的裂变几率可以与非彈性散射几率相比較,并且比輻射俘获的几率大得多。这种快中子鏈式反应曾被用在原子彈以及主要由濃縮鈾、結構材料和冷却剂所組成的快中子反应堆中。

热中子反应

在天然鈾中,由于 ^{238}U 的共振吸收,在高中能或者中間能量处,不可能产生鏈式反应。然而,在非常低的中子能量处(即在 ^{238}U 的共振区域以下), ^{235}U 的裂变截面是非常大的(大約比 ^{238}U 的俘获截面大 200 倍),因而甚至在天然鈾中,平均每吸收一个低能中子可以产生一个以上的第二代中子。因此,假如設法使裂变所产生的中子减速到低能(低于 ^{238}U 的共振区域),且当减速时在 ^{238}U 中沒有显著的吸收,那末在天然鈾中(利用 ^{235}U 作为燃料)发散的鏈式反应是可能实现的。

这一点可以利用与鈾同时存在的低原子量和弱中子吸收的材料来实现。这种材料称为减速剂。中子与减速剂原子发生彈性碰

撞,并且将它的能量分配给几乎静止的原子,使本身减速,直至能量与减速剂原子的热振动能量相接近时为止。于是,中子达到与减速剂原子的热能相平衡的能量,这种中子称为热中子。如果减速剂原子是足够地轻以及具有足够数量的减速剂,那末中子将迅速地减速,且通过共振区域时与 ^{238}U 原子相遇而遭到俘获的机会是很小的。于是热中子引起裂变,产生链式反应。按这种方式工作的核反应堆称为热中子反应堆。

实际上几乎对于所有的减速剂来说都发现下列情况:如果天然铀与减速剂均匀地混合在一起,由于 ^{238}U 的共振吸收几率仍然太大,不可能完成发散的链式反应。增加减速剂虽然能够减小共振吸收,但是这个效果会被减速剂本身对中子的附加损失所抵销。费米(Fermi)和斯士拉特(Szilard)建议:将铀制成分离的块状来代替与减速剂均匀地混合,就可以减小共振吸收。这样,由于共振能量的中子大部分被每一个铀块的外层所吸收,所以铀块内部就可以避免这些中子的进入。

因而,几乎唯一可能的天然铀反应堆的型式是非均匀热中子反应堆,也就是指将分离的铀块埋置在减速剂中的一种核反应堆(如果使用浓缩铀,则均匀热中子反应堆是可能的;如果使用重水作为减速剂,则天然铀的均匀热中子反应堆恰好是可能的)。为了使操作和冷却方便起见,实际上铀块就是安置在减速剂母体中栅格上的铀棒。

反应堆的分类

裂变反应堆通常可以用下列二种方法来进行分类:

1. 按链式反应的类型

(a) 快中子反应堆:大多数裂变是由具有接近于裂变能量(1兆电子伏数量级)的中子所引起的。

(b) 热中子反应堆:大多数裂变是由具有热能(0.1电子伏数

量級)的中子所引起的。

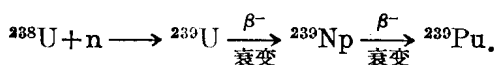
(c) 中能中子反应堆：堆內含有一些減速剂，但不足以使大多数中子热化。大多数裂变是由具有能量在 0.1 电子伏到 0.1 兆电子伏範圍内的中子(取决于設計)所引起的。

目前，現有的以及正在設計或者建造中的大多数反应堆都是热中子反应堆，而本书主要是討論这种类型的反应堆的。书中特別以英国正在建造中的用来产生动力的天然鈾石墨減速的热中子反应堆作为例子。但是其中所使用的方法却可以推广到其他类型的反应堆中去。

2. 按使用的目的

(a) 作为产生动力用：在一个設計得很恰当的系統內可以把裂变所产生的热轉移后轉換成有用的动力。

(b) 生产可裂变的材料：在含有 ^{235}U 的反应堆中，所产生的大部分中子被 ^{238}U 所吸收。就維持鏈式反应來說，这些中子是損失掉了；但是由于它們借助于下述反应将 ^{238}U 轉換成鈾，因而实际上它們並沒有被白白地浪費掉。



^{239}Pu 是稳定的和对慢中子是可裂变的，并且由于它的化学性质与鈾不同，所以可以把它从輻照燃料中分离出来。因而，可以从天然鈾中制造出純的可裂变材料，并将它应用到使用天然鈾不能达到临界的燃料反应堆中，或者用来制造原子彈。在反应堆中，利用鈾吸收中子制成 ^{235}U 同样地可以生产出可裂变材料。

(c) 供研究用：作为高强度中子源的反应堆可以用来研究核物理和材料的中子輻照效应；也可以用来制造放射性同位素。

天然鈾热中子反应堆

典型的天然鈾热中子反应堆是由在減速材料母体中鈾棒的栅

格所组成的(图4)。为了转移由裂变所产生的热,铀的冷却是必需的,

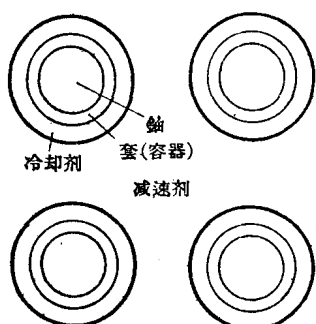


图4 热中子反应堆栅格

的,因而要用冷却剂循环管道包围铀。为了预防(1)放射性裂变产物对冷却剂的沾污,(2)冷却剂对铀的腐蚀,把铀棒包含在一个金属容器(或者管套)中。

本书的大部分篇幅是用来叙述在这样的一个系统中如何来计算链式反应的条件。

在热中子反应堆中的中子能量

由裂变所产生的中子借助于与减速剂原子发生碰撞而减速,直到它们变成热中子,即直到它们与减速剂原子的热振动达到平衡时为止。热中子进一步与减速剂原子发生碰撞后不再引起能量的损失,因而在减速剂中的扩散正象分子在气体中的扩散一样。所以,热中子的能量分布是由减速剂温度来决定的,并且由与气体中分子的能量分布同样的表示式所给定。这就是由统计力学的气体动力论导出的麦克斯韦-玻耳兹曼分布(图5):

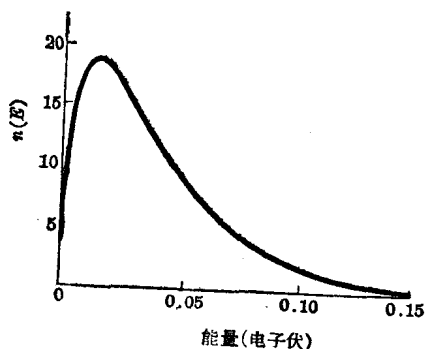


图5 热中子在 20°C 时的能量分布

$$n(E)dE = \left\{ \frac{2\pi}{(\pi k'T)^{3/2}} \right\} \exp\left(\frac{-E}{k'T}\right) \cdot E^{\frac{1}{2}} dE, \quad (1.1)$$

这里, $n(E)dE$ = 在 E 到 $E+dE$ 范围内的中子部分,

k = 玻耳兹曼常数 ($= 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/ $^{\circ}\text{C}$),

T = 减速剂温度 (以 $^{\circ}\text{K}$ 为单位).

只有当没有中子吸收时, 这个表示式才是严格地正确的. 由于低能中子倾向于优先被吸收, 因而引起这个分布的畸变, 但是经过畸变后的分布仍可近似地用 T 值稍高这种形式的表示式来表示. 所以, 对于反应堆中的热中子, 由于在燃料中的中子吸收, 中子温度 (即适合于实际中子能量分布的麦克斯韦-玻耳兹曼表示式中的 T 值) 略大于减速剂的温度.

从麦克斯韦-玻耳兹曼表示式可以证明: 最可几速度具有 $1.28 \times 10^4 \sqrt{T}$ 厘米/秒的值; 而相应的动能是 kT , 其值为 $(8.61 \times 10^5 T)$ 电子伏. 它与最可几能量 (等于 $\frac{1}{2} kT$) 不同, 也与平均能量 (等于 $\frac{3}{2} kT$) 不同. 通常将相当于中子速度为 2200 米/秒 (即能量为 0.053 电子伏) 的中子截面值制成表格, 也就是说, 把温度为 20.4°C (即 $T = 293.6^{\circ}\text{K}$) 时在热中子分布中具有最可几速度的中子截面值制成表格.

在热中子反应堆中, 除了热中子以外, 还有减速过程中的中子, 这些中子具有比热中子为更高的能量, 并且称为超热中子.

在热中子反应堆中中子的寿命循环^[1]

图 6 表明在热中子反应堆中的中子的寿命循环.

作出了下列三个简单的假定:

(1) 热中子可以用单组中子来表示, 全部具有同样的平均能

量.

[1] 寿命循环 (life cycle) 是指每一代的变化过程. ——译者注