

第1章 核反应堆的核物理基础

1)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，由**核燃料**、**冷却剂**、**慢化剂**、**结构材料**和**吸收材料**组成的一个复杂系统。 (P1)

2)通常按中子能量的大小把它们分为三类:1)**快中子**($E>0.1\text{MeV}$); 2)**中能**或**超热**中子($1\text{eV}<E<0.1\text{MeV}$);

3)**热中子**($E<1\text{eV}$)。 (P2)

3)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**。 (P2)

a.**势散射**是最简单的核反应，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动能和动量守恒，是一种**弹性散射**。 (P3)

b.**共振弹性散射**{(n,n)反应}：靶核吸收一个中子，若放出的核子为中子，而余核 A_ZX 又重新直接回到基态，就称这个过程为n, n反应。表达式为： ${}^A_ZX+{}_0^1n \rightarrow [{}^A_ZX]^* \rightarrow {}^A_ZX+{}_0^1n$ (P4)

c.在**快中子反应堆**中，**非弹性散射**（具有阈能特点）重要；在**热堆**中，对中子慢化起主要作用的是**弹性散射**。 (P5)

4)**共振现象**：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，这种现象就叫做共振现象。 (P4)

5)**微观截面**：表征一个入射中子与单位面积内一个靶核发生作用的几率大小； $\sigma = \frac{-dI/I}{N\Delta x} = \frac{-dI/I}{N\Delta x}$ ，单位 m^2 ，巴恩— $1\text{b}=10^{-28}m^2$ 。 (P8)

6)**宏观截面**：一个中子与单位体积内所有原子核发生核反应的平均概率大小的一种度量。设 ρ 为材料密度，A为该元素的原子量， $N_0=6.0221367\times 10^{23}mol^{-1}$ ，则 $\Sigma = N\sigma = \frac{-dI/I}{dx}$ ， $N = \frac{N_0\rho}{A}$ 单位： m^{-1} (P9)

7)平行**中子束的强度**为： $I(x)=I_0e^{-\Sigma x}$ ， I_0 为入射平行中子束的强度，即靶表面的中子束强度。(P9)

8)放射性物质**质量与时间**关系式为： $m(t)=m_0e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}t}$ m_0 为初始质量， $T_{1/2}$ 为半衰期时间。 (P9)

9)**平均自由程**：中子在介质中运动时，与原子核连续两次相互作用之间穿行的平均距离。

$$\lambda = \bar{x} = \int_0^{\infty} xP(x)dx = \Sigma \int_0^{\infty} xe^{-\Sigma x} dx = \frac{1}{\Sigma}，单位：m。 (P11)$$

10)**中子通量密度**：单位体积内所有中子在单位时间内穿行距离的总和。 $\phi = nv$ 单位：中子/($m^2 \cdot s$)

$$\text{或(中子 } / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})) \quad (\text{P12})$$

11) **核反应率**: 每秒每单位体积内的中子与介质原子核发生作用的总次数。 $R = nv\Sigma = \Sigma\phi$ 单位: 中子 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 。 (P12)

12) **俘获-裂变比**: 辐射俘获与裂变截面之比通常用 α 表示; 即 $\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f$ (P17)

13) **多普勒效应或多普勒展宽**: 由于靶核的热运动随温度的增加而增强, 所以这时共振峰的宽度将随着温度的上升而增加, 同时峰值截面也逐渐减小, 我们称这种现象多普勒展宽。 (P23)

14) 每次裂变放出的平均中子数, 用 $\nu(E)$ 表示。对于 ^{235}U 和 ^{239}Pu 经验公式给出 (P27)

$$\nu_{235}(E) = 2.416 + 0.133E, \quad \nu_{239}(E) = 2.862 + 0.135E$$

15) **缓发中子**: 裂变中子中, 还有小于 1% 的中子 (对 ^{235}U 裂变, 约为 0.65%) 是在裂变碎片衰变过程中发射出来的, 把这些中子叫缓发中子。 (P27)

16): **不泄漏率** $\Lambda = \frac{\text{系统内中子的吸收率}}{\text{系统内中子的吸收率} + \text{系统内中子的泄漏率}} = \Lambda_s \Lambda_d$ (P31)

17) **快中子增殖因数** ϵ : 由一个初始裂变中子所得到的、慢化到 ^{238}U 裂变阈能以下的平均中子数;

逃脱共振俘获概率 p : 热中子利用系数 $f = \text{燃料吸收的热中子数} / \text{被吸收的热中子总数}$;

有效裂变中子数 η : 核燃料每吸收一个热中子所产生的平均裂变中子数, $\eta = \frac{\nu\Sigma_f}{\Sigma_a} = \frac{\nu\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a} = \frac{\nu}{1 + \alpha}$;

不泄漏率 Λ : $\Lambda = \Lambda_s \Lambda_d$, Λ_s 为慢化过程中的不泄漏率, Λ_d 为扩散过程中的不泄漏率。 (P33)

18) **无限介质增殖因数** $k_\infty = \epsilon p f \eta$ 即为四因子公式。

有效增殖因数 K_{eff} : 对给定系统, 新生一代的中子数和产生它的直属上一代中子数之比。

$$k_{eff} = \frac{\text{新生一代中子数}}{\text{直属上一代中子数}} = \frac{\text{系统内中子的产生率}}{\text{系统内中子的总消失率(吸收+泄漏)率}} \quad (\text{P30})$$

$$\text{即: } k_{eff} = \frac{n\epsilon p f \eta \Lambda_s \Lambda_d}{n} = k_\infty \Lambda$$

第2章 中子慢化和慢化能谱

1) **慢化过程**: 中子由于散射碰撞而降低速度的过程叫做慢化过程。 (P36)

2) **中子慢化能谱**: 当反应堆处于稳定时, 在慢化过程中, 堆内中子密度 (或中子通量密度) 按能量具

有稳定的分布，称之为中子慢化能谱。 (P36)

3) $E' = \frac{1}{2}[(1+\alpha) + (1-\alpha)\cos\theta_c]E$ ，① $\theta_c = 0^\circ$ 时 $E' \rightarrow E_{\max} = E$ ，此时碰撞前后中子没有能量损失；

② $\theta_c = 180^\circ$ 时， $E' \rightarrow E_{\min} = \alpha E$ 。故一次碰撞的最大损失为 $\Delta E = (1-\alpha)E$ (P39)

4) **散射函数**：设碰撞前中子能量为 E ，碰撞后中子能量为在 E' 附近 dE' 内的概率，通常称 $f(E \rightarrow E')$

为散射函数。 $f(E \rightarrow E')dE' = -\frac{dE'}{(1-\alpha)E}$ ， $\alpha E \leq E' \leq E$ ， $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$ ， $\int_E^{\alpha E} f(E \rightarrow E')dE' = 1$ 。其中：

A-靶核与中子质量比。 (P40)

5) **勒（平均对数能降）**： $u = \ln(E_0/E)$ ， $E = E_0 e^{-u}$ 其中 E_0 为选定的参考能量，一般取 $E_0 = 2MeV$ 。

一次碰撞后对数能降的增加量为 Δu ， $\Delta u = u' - u = \ln \frac{E_0}{E'} - \ln \frac{E_0}{E} = \ln \frac{E}{E'}$ ， u 和 u' 分别为碰撞前和碰撞后的对数能降。

一次碰撞后最大的对数能降增量，用 γ 表示， $\gamma = \Delta u_{\max} = \ln(1/\alpha)$ 。

平均对数能降 ξ ： $\xi = \overline{\ln E - \ln E'} = \overline{\ln(E/E')} = \overline{\Delta u}$ ， $\xi = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left(\frac{A+1}{A-1} \right)$

当 $A > 10$ 时，取近似式 $\xi = \frac{2}{(A+2/3)}$ (P41)

6) 若用 N_c 表示中子从初始能量 E_1 慢化到 E_2 所需要的**平均碰撞次数**。 $N_c = \frac{\ln E_1 - \ln E_2}{\xi}$ (P42)

7) **平均散射角余弦 $\overline{\mu_0}$** ： $\overline{\mu_0} = \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos\theta_c \sin\theta_c d\theta_c = \frac{2}{3A}$ 。因而，尽管在 C 系内散射是各向同性的，但在 L

系内散射却是各向异性的，并且 $\overline{\mu_0} > 0$ ， $\overline{\mu_0}$ 数值的大小便表征散射各向异性的程度。 $\overline{\mu_0}$ 随着靶核质量数的减小而增大，故靶核的质量越小，中子散射后各向异性的概率就越大。 (P43)

8) **慢化剂的慢化能力**：宏观散射截面和平均对数能降的乘积， $\Sigma_s \xi$ ，慢化比 $\Sigma_s \xi / \Sigma_a$ (P43)

9) **慢化时间 t_s** ：在无限介质内，裂变中子由裂变能 E_0 慢化到热能 E_{th} 所需要的平均时间。于是由 E_0 慢

化到 E_{th} 所需的时间为： $t_s = -\int_{E_0}^{E_{th}} \frac{\lambda_s(E) dE}{\xi v E} \approx \sqrt{2} \frac{\overline{\lambda_s}}{\xi} \left[\frac{1}{\sqrt{E_{th}}} - \frac{1}{\sqrt{E_0}} \right]$

扩散时间 t_d ：无限介质内热中子在自产生至被俘获以前所经过的平均时间，也称为热中子寿命。对

于 $1/v$ 吸收介质的热中子的平均寿命与中子能量无关，表达式为： $t_d(E) = \frac{\lambda_a(E)}{v} = \frac{1}{\Sigma_a(E)v} = \frac{1}{\Sigma_{a0}v_0}$

中子平均寿命 l ：快中子自裂变产生到慢化成为热中子，直至热中子被俘获的平均时间， $l = t_s + t_d$

热中子反应堆，中子平均寿命主要**由扩散时间即热中子寿命决定**。 (P45)

10) **慢化密度** $q(r, E)$ ：在 r 处每秒每单位体积内慢化到能量 E 以下的中子数。

稳态无限介质内的中子慢化方程： $\Sigma_t(E)\phi(E) = \int_{\infty}^E \Sigma_s(E')\phi(E')f(E' \rightarrow E)dE' + S(E)$ ，它的解就是中子慢化能谱。 (P46)

11) **无吸收单核素无限介质**情况：反应堆内渐进情况下，慢化能谱为： $\phi(E) = q(E) / \xi \Sigma_s E$ 。对无吸收

情况，单能源， $q(E) = S_0$ ，因而上式 $\phi(E) = S_0 / \xi \Sigma_s E$ 。 (P47)

12) 无限无吸收介质内中子慢化能谱分布： $\phi(E) = \frac{q(E)}{\xi \Sigma_s E}$ ，服从 $1/E$ 分布或称之为费米谱分布。 (P48)

13) 共振峰 i 的**有效共振积分**表达式： $I_i = \int_{\Delta E_i} \sigma_a(E)\phi(E)dE$ ，其中 $\phi(E) = 1/E$ 。 (P50)

14) **能量自屏效应**：当中子截面呈共振峰形状时，在共振能量附近有很大的增大和剧变，这就导致中子

通量密度急剧下降畸变，在 E_i 附近中子通量密度出现很大的凹陷，这种现象称之为共振的“能量自屏效应”，它使共振吸收减小。 (P53)

15) **分界能**（缝合能）：反应堆物理分析中，通常把某个分界能量 E_c 以下的中子成为热中子， E_c 称为分界能

或者缝合能。例如：压水堆通常取 $E_c = 0.625\text{eV}$ 。 (P54)

16) **热中子**：指它们所在介质的原子（或）分子处于热平衡状态中的中子。 (P54)

17) **麦克斯韦—波尔兹曼**分布式： $N(E) = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} e^{-E/kT} E^{1/2}$ 式中： $N(E)$ 为单位体积单位能量间隔

内的热中子数； k 为波尔兹曼常数； T 为介质温度，单位为 K 。 (P54)

18) 热中子能谱的硬化：热中子的平均能量和最概然能量都要比介质原子核的平均能量和最概然能量

高，通常把这一现象称之为热中子能谱的“硬化” (P55)

19) **中子温度** T_n 与**介质温度** T_M 的关系式为： $\frac{T_n - T_M}{T_M} = C \frac{\sum_a(kT_M)}{\xi \Sigma_s}$ ，或 $T_n = T_M \left(1 + C \frac{\sum_a(kT_M)}{\xi \Sigma_s} \right)$ ，若

各元素吸收截面服从 $1/v$ 律，则 $\sum_a(kT_M) = \sum_a(0.0253) \sqrt{\frac{293}{T_M}}$ ，对于一些弱吸收的纯慢化剂，中子

温度近似公式计算为： $\begin{cases} T_n = T_M(1 + 0.46\Delta), \text{当 } A \leq 25 \text{ 时}, 0 < \Delta < 1 \\ T_n = T_M(1 + 0.3\Delta), \text{当 } A \geq 25 \text{ 时} \end{cases}$ ，其中 $\Delta = \frac{2A \sum_a(kT_M)}{\Sigma_s}$ (P56)

20) 热中子的**平均吸收截面** $\bar{\sigma}_a$ ：

$$\text{服从 } 1/v \text{ 律的计算式: } \bar{\sigma}_a = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{0.0253}{kT_n}} \sigma_a(0.0253) = \frac{\sigma_a(0.0253)}{1.128} \sqrt{\frac{293}{T_n}}$$

$$\text{不服从 } 1/v \text{ 律, 引入修正因子 } g_a, \text{ 表达式为: } \bar{\sigma}_a = \frac{\sigma_a(0.0253)}{1.128} \sqrt{\frac{293}{T_n}} g_a \quad (\text{P57})$$

第3章 中子扩散理论

1) **输运过程**: 由于中子与原子核间的无规则碰撞, 中子在介质内的运动是一种杂乱无章的具有统计性质的运动, 即初始在堆内某一位置具有某种能量及某一运动方向的中子, 在稍晚些时候, 将运动到堆内的另一位置以另一能量和另一方向出现, 这一现象成为中子在介质内的输运过程。(P60)

2) **斐克定律**: 中子流密度 J 正比于负的中子通量密度梯度, 其比例常数叫作扩散系数 D , 表达式可写

$$\text{为: } J = J_x i + J_y j + J_z k = -\frac{\lambda_s}{3} \text{grad} \phi = -D \text{grad} \phi$$

$$\text{其中 } D = \frac{\lambda_{tr}}{3}, \lambda_{tr} = \frac{\lambda_s}{1 - \mu_0}, \mu_0 = \frac{2}{3A}, A \text{ 为靶核质量数} \quad (\text{P66})$$

3) **扩散方程边界条件**: ①在扩散方程适用的范围内, 中子通量密度的数值必须是正的、有限的实数; ②在两种不同扩散性质的介质交界面上, 垂直于分界面的中子流密度相等, 中子通量密度相等。(P69)

4) **单能中子扩散方程**: $\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(r, t)}{\partial t} = S(r, t) + D \nabla^2 \phi(r, t) - \Sigma_a \phi(r, t)$ 。若中子通量不随时间变化,

$$\text{则 } D \nabla^2 \phi(r) - \Sigma_a \phi(r) + S(r) = 0 \text{ 称为稳态单能中子扩散方程。} \quad (\text{P68})$$

$$5) \text{无限介质内点源情况: } \phi(r) = \frac{S e^{-r/L}}{4\pi D r}$$

6) **扩散长度** L : 表征中子从慢化成为热中子处到被吸收为止在介质中运所穿行的直线距离, 表达式为:

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} = \frac{\lambda_a \lambda_s}{3(1 - \mu_0)} = \frac{1}{3 \Sigma_a \Sigma_s (1 - \mu_0)}$$

慢化长度 $\sqrt{\tau_{th}}$: 快中子从产生地点在介质中运动被慢化为热中子时所穿行的直线距离, 数学表达式

$$\text{为: } \tau_{th} = L^2 = \frac{D}{\Sigma_1} = \frac{1}{3 \xi \Sigma_a \Sigma_{tr}} \ln \frac{E_{th}}{E_0}。 \text{热中子年龄 } \tau_{th}: \text{慢化长度的平方, 单位: } \text{m}^2。 \quad (\text{P81})$$

徙动面积 M^2 : $M^2 = L^2 + \tau_{th}$, L 为扩散长度, τ_{th} 是热中子年龄, M 为徙动长度。

徙动长度 M 是影响芯部中子泄漏程度的重要参数, M 愈大, 则中子不泄漏概率便愈小。(P82)

第4章 均匀反应堆的临界理论

1) **单群理论的临界方程** $k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + L^2 B^2} = 1$, 此时 **基波特征函数** 分布为: $\nabla^2 \phi(r) + B_g^2 \phi(r) = 0$ (P92)

2) 几种几何形状的裸堆 **几何曲率** 和中子通量密度分布 (P97)

球形 (半径为 R) 几何曲率: $B_g^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2$, 中子通量密度分布: $\phi(r) = \frac{1}{r} \sin\left(\frac{\pi}{R} r\right)$

直角长方体 (变长: a, b, c) $B_g^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2$ $\phi(r) = \cos\left(\frac{\pi}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi}{b}\right) \cos\left(\frac{\pi}{c}\right)$

圆柱体 (半径 R , 高 H) $B_g^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$ $\phi(r) = J_0\left(\frac{2.405}{R} r\right) \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right)$

3) **材料曲率**: $B_m^2 = (k_{\infty} - 1) / L^2$ (P98)

4) 已知反应堆 **功率** 为 P , 芯部的 **体积** 为 V , 每次裂变产生的能量为 E_f , 则整个堆芯的 **总功率** 为:

$$P = E_f \int_V \Sigma_f \phi(r) dV, \text{ 对于圆柱形裸堆: } V = \pi R^2 H,$$

$$P = E_f \Sigma_f C \int_0^R \int_0^{\frac{H}{2}} 2J_0\left(\frac{2.405r}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right) 2\pi r dr dz \Rightarrow C = \frac{3.64P}{VE_f \Sigma_f}$$

同理, 球形裸堆 $V = \frac{4}{3} \pi R^3$, $C = \frac{3.29P}{VE_f \Sigma_f}$. (P98)

5) **反应性**: $\rho = (k - 1) / k$, 对于临界反应堆, $\rho = 0$; 若 $\rho > 0$, 超临界; 若 $\rho < 0$, 次临界。 $|\rho|$ 大小表示反应堆偏离临界状态的程度。 (P99)

6) 热中子反应堆的 **修正单群理论**: $k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B_g^2} = 1$ 或 $B_m^2 = \frac{k_{\infty} - 1}{M^2}$ (P100)

7) 带有 **反射层** 的 **球形反应堆** 的 **单群临界方程**: $D_c [1 - B_c R \cot(B_c R)] = D_r \left[1 + \frac{R}{L_r} \coth\left(\frac{T}{L_r}\right) \right]$, 它给出了反应堆的几何尺寸 (R, T) 与材料特性 (L_r, D_r, D_c 等) 之间在临界时所应满足的关系。 (P104)

8) **反射层节省** δ 表达式。球形时: $\delta_r = R_0 - R$, 其中 R_0 (包括外推距离) 为裸堆时临界半径。

对于圆柱形反应堆, 反射层节省表示为, 径向: $\delta_r = R_0 - R$, 轴向: $\delta_z = \frac{H_0}{2} - \frac{H}{2}$ (P107)

9) 对带有 **反射层堆的几何曲率计算**

- 5) 等效栅元的半径 R ，正方形栅元： $R = a/\sqrt{\pi} = 0.56419a$ ；六角形栅元： $R = 0.52504a$ 。(P143)
- 6) 窄共振近似(NR)：指共振峰密度比较陡峭的一类，其中子与燃料核弹性散射的平均能量损失 $\overline{\Delta E_F} = (1 - \alpha_F) E_0 / 2$ 比共振峰的宽度大得多。
- 宽共振近似(NRIM)：共振峰的实际宽度 Γ_p 大于 $\overline{\Delta E_F}$ 的那些共振峰，这时中子在共振峰内将经受不止一次弹性碰撞。(P155)
- 7) 当燃料温度 T 升高时，由于多普勒展宽，能量自屏效应和空间自屏效应减弱，都将使共振吸收增大，从而使有效增殖因数 k_{eff} 和反应性 ρ 变小，其反应性效应总是负的。(P159)
- 8) 栅格几何参数主要是指燃料块厚度、半径和栅距。(P161)
- 9) **最佳栅格**：在给定燃料富集度和慢化材料的情况下，存在着使栅格的无限增殖因数达到极大值或临界体积为极小的几何栅格参数，有时我们把这样的栅格叫作最佳栅格。(P162)

第7章 反应性随时间的变化

- 1) **燃耗步长**：把运行时间 t 分成许多时间间隔，每一时间间隔 (t_{n-1}, t_n) 称为燃耗时间步长。(P169)
- 2) 的**单群近似下的有效增殖因数**表达式： $k = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a^F + \Sigma_a^M} p \Lambda$ ， F, M 分别表示燃料和慢化剂。(P173)
- 3) **裂变产物中毒**：由于裂变产物的存在，吸收中子而引起的反应性变化成裂变产物中毒。(P173)
- 4) **平衡氙中毒** $\rho_{Xe}(\infty)$ ， $\rho_{Xe}(\infty) \approx -\frac{\Sigma_{Xe}}{\Sigma_a} = -\frac{\gamma \Sigma_f}{\Sigma_a} \frac{\phi}{\frac{\lambda_{Xe}}{\sigma_a^{Xe}} + \phi}$ ，可知 $\rho_{Xe}(\infty)$ 与热中子通量密度 ϕ 水平有关，当 ϕ 很小时， $\rho_{Xe}(\infty)$ 也很小。当 $\phi > 10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时， $\lambda_{Xe} / \sigma_a^{Xe}$ 与 ϕ 相比可忽略不计，即有 $\rho_{Xe}(\infty) \approx -\gamma \Sigma_f / \Sigma_a$ 。(P176)
- 5) **碘坑**：反应堆停堆后 ^{135}Xe 的浓度先是增加到最大值，然后逐渐地减小；剩余反应性随时间变化则与 ^{135}Xe 浓度的变化刚好相反，先是减小到最小值，然后又逐渐地增大。因为这一现象主要是由于停堆后 ^{135}I 继续衰变成 ^{135}Xe ，使 ^{135}Xe 浓度增大所引起的，我们称这一现象为“碘坑”。
- 允许停堆时间 t_p 、强迫停堆时间 t_f ；
- 碘坑深度**：停堆后反应堆剩余反应性下降到最小值的程度称为碘坑深度。与反应堆停堆前运行的热中子通量密度 ϕ （或运行功率）值密切相关， ϕ 愈大，碘坑深度愈深。

- 碘坑时间 t_i : 从停堆时间开始直到剩余反应性又回升到停堆时刻的值时所经历的时间。 (P180)
- 6) ^{149}Sm 的平衡浓度与热中子通量密度无关, 即与功率无关。 (P186)
- 7) **堆芯周期**: 一个新装料堆芯从开始运行到有效增殖因数降到 1 时, 反应堆满功率运行的时间。(P187)
- 8) **燃耗深度**: 装入堆芯的单位重量核燃料所产生的总能量的一种度量, 也是燃料贫化程度的一种度量。表示方法之一为单位质量燃料所发出的能量作为燃耗深度的单位。

$$BU = \int_0^T P(t)dt / W_U$$
, 单位: $MW \cdot d / t$ (核燃料质量指燃料中重元素(铀、钚和钍)的质量, 如在计算 W_U 时, 必须把燃料中氧 O 的份额扣除)。 (P190)
- 9) **转换比 CR**: 反应堆中每消耗一个易裂变材料原子所产生新的易裂变材料的原子数, 即

$$CR = \frac{\text{易裂变核的生成率}}{\text{易裂变核的消耗率}} = \frac{\text{堆内可转换物质的辐射俘获率}}{\text{堆内所有易裂变物质的吸收率}}$$
 当 $CR > 1$ 时, 称为**增殖比 BR**。 (P192)
- 10) **倍增时间**: 由于增殖, 反应堆内易裂变同位素的数量比初始装载量增加一倍所需的时间。 (P195)
- 11) **增殖增益 G**: 系统中每消耗一个易裂变同位素的原子核所得到的净增加的易裂变同位素核数。表示为:

$$G = BR - 1 = [(\eta - 1) - A - L + F] - 1$$
 (P194)
- 12) **指数倍增时间**: $T_{DI} = \frac{M_0}{GBP_0(1 - F')}$, 其中: F' 为可转化材料的裂变数占总裂变数的份额; P_0 为反应堆运行功率; B 是每单位功率每天消耗的易裂变同位素数量; M_0 为反应堆内易裂变材料的初始装载量。 (P196)

第8章 温度效应与反应性控制

- 1) 目前压水堆常采用的三种控制方式——**控制棒控制、可燃毒物控制和化学补偿控制**。 (P200)
- 2) **反应性系数**: 反应堆的反应性相对于反应堆的某一参数的变化率成为该参数的反应性系数。如: 反应性温度系数 $\alpha_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{k} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T} - \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}^2} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T} \approx \frac{1}{k_{eff}} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T}$, 功率系数等等。反应性系数的大小决定了反馈的强弱, 为保证安全, 要求反应性系数为**负值**, 以形成**负反馈效应**。 (P200)
- 燃料温度系数 α_T^F** : 由单位燃料温度变化所引起的反应性变化称为燃料温度系数。 (P202)
- 慢化剂温度系数 α_T^M** : 由单位慢化剂温度变化所引起的反应性变化称为燃料温度系数。 (P203)
- 空泡系数 α_V^M** : 在反应堆中, 冷却剂的空泡份额变化百分之一(1%)所引起的反应性变化 (P205)
- 功率反应性系数 α^P** : 单位功率变化所引起的反应性变化称为功率反应性系数。 (P205)

3) **剩余反应性**：堆芯中没有任何控制毒物时的反应性称为剩余反应性，以 ρ_{ex} 表示；

控制毒物价值：某一控制毒物投入堆芯时，反应堆所达到的负反应性，以 $\Delta\rho_i$ 表示；

停堆深度：当全部控制毒物都投入堆芯时，反应堆所达到的负反应性，以 ρ_s 表示；

总的被控反应性： $\Delta\rho = \rho_{ex} + \rho_s$ 。 热中子的大于快中子的 (P207)

4) **反应性控制的任务**：1、紧急调节；2、功率调节；3、补偿控制。 (P208)

5) **反应性控制的三种方式**：控制棒控制、固体可燃毒物控制、化学补偿控制。 (P209)

6) **控制棒材料要求**：①具有很大的中子吸收截面，银-铟-镉（Ag-In-Cd）；②有较长的寿命；③具有抗辐照、抗腐蚀和良好的机械性能，同时价格便宜。 (P210)

7) **控制棒的积分价值**：当控制棒从一初始参考位置插入到某一高度时，所引入的反应性称为这个高度上的控制棒积分价值。

控制棒的微分价值：控制棒在堆芯不同处移动单位距离所引起的反应性变化。 (P215)

8) 考虑控制棒的相互干涉效应，设计堆芯时，应使控制棒的间距大于热中子扩散长度。 (P216)

可燃毒物材料要求：①具有较大的吸收截面；②在堆芯寿期末，可燃毒物的残余量应尽可能少；③可燃毒物及其结构材料应具有良好的机械性能。 主要元素有：硼B和钆（Gd）。 (P218)

对化学毒物的要求：能溶解于冷却剂中，化学性质和物理性质稳定；具有较大的吸收截面；对堆芯结构部件无腐蚀性且不吸附在部件上。 压水堆一般采用硼酸。 (P222)

化学毒物主要补偿以下慢变化的反应性：①反应堆从冷态到热态（零功率）时，慢化剂温度效应所引起的反应性变化；②裂变同位素燃耗和长寿命裂变产物积累所引起的反应性变化；③平衡氙和平衡钷所引起的反应性变化。 (P223)

化控优点：①化学补偿毒物在堆芯中分布比较均匀；②化控不但不引起堆芯功率分布的畸变，而且与燃料分区相配合，能降低功率峰因子，提高平均功率密度；③化控中的硼浓度可以根据运行需要来调节，而固体可燃毒物是不可调节的；④化控不占栅格位置，不需要驱动机构等，从而简化反应堆结构，提高反应堆的经济性。 (P223)

化控缺点：①只能控制慢变化反应性；②需要加硼和释硼的一套附加设备系统；③最主要缺点是水中硼浓度的大小对慢化剂温度系数有显著的影响。 (P223)

第9章 核反应堆动力学

1) **反应堆周期** T : 反应堆内中子密度变化 e 倍所需要的时间为反应堆周期（也称反应堆时间常数）。表

$$\text{达式为: } T = l / (k_{eff} - 1), \quad l = t_s + t_d \text{ 为瞬发中子的寿命。有 } n(t) = n_0 e^{t/T} \quad (P229)$$

2) 考虑缓发中子后裂变中子的平均寿命 \bar{l} 为
$$\bar{l} = (1 - \beta)l + \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i \quad (P230)$$

3) **考虑缓发中子** 效应后的反应堆动态方程，通常称为 **点堆模型动态方程**:

$$\text{表示为 } \begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{k_{eff}(1 - \beta) - 1}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i}{dt} = \beta_i \frac{k_{eff}}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t); i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{cases} \quad \text{或者} \quad \begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t); i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{cases}$$

$$\text{其中 } \Lambda \text{ 为中子每代时间, } \Lambda = l / k_{eff} \quad (P232)$$

4) **点堆模型**: 假定不同时刻中子通量密度 $\phi(r, t)$ 在空间中的分布形状不变，也就是说，堆内各点密度随时间的变化涨落是同步的，堆内中子就好像堆芯没有线度尺寸一样，可以把它看作一个集总参数的系统来处，所以这个模型称为点堆模型。

点堆模型的主要 **限制** 在于它 **不能描述** 与 **空间** 有关的动力学效应，通常表现为反应性的 **局部扰动** 和 **过渡过程** 中中子通量密度空间分布随时间的 **快速畸变**。

由于实际中子通量密度的显著畸变和倾斜，用点堆模型求得的中子通量密度峰值将 **大大低于实际** 中子通量密度的 **峰值**。

点堆动力学只适用于反应堆偏离临界状态不远和扰动不太大的问题。

5) **反应性方程** $\rho = \Lambda \omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \omega}{\omega + \lambda_i}$ 或 $\rho = \frac{l \omega}{1 + l \omega} + \frac{1}{1 + l \omega} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \omega}{\omega + \lambda_i}$ (P234)

6) 不同反应性 ρ_0 引入时反应堆的响应特性:

$$\textcircled{1} \rho_0 \ll \beta: \rho_0 \approx \omega_1 l + \omega_1 \sum_{i=1}^6 \beta_i / \lambda_i \Rightarrow T = \frac{1}{\omega_1} \approx \frac{1}{\rho_0} \left[l + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} \right] = \frac{\bar{l}}{\rho_0} \text{ 简化为 } T \approx \frac{1}{\rho_0} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} = \frac{1}{\rho_0} \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i,$$

此时反应堆周期与瞬发中子寿命 l 无关，而与引入的反应性成正比；

$$\textcircled{2} \rho_0 \gg \beta: \rho_0 \approx \Lambda \omega_1 + \beta \text{ 或 } T = \frac{1}{\omega_1} \approx \frac{\Lambda}{\rho_0 - \beta} \approx \frac{\Lambda}{\rho_0}, \text{ 此时反应堆的响应特性主要决定于瞬发中子}$$

的每代时间；

③ $\rho_0 = \beta$: 这时仅依靠瞬发中子即可使反应堆保持临界，成为**瞬发临界**。当 $\rho_0 < \beta$ 时，反应堆要达到临界尚需缓发中子作出贡献，因而反应堆的时间特性在很大程度上由先驱核 β 衰变的时间决定。当 $0 < \rho_0 < \beta$ 时，成为**缓发临界**。而当 $\rho > \beta$ 时，成为**瞬发超临界**，此时即使完全不考虑缓发中子，有效增殖因数也会大于 1。

瞬发临界条件: $\rho = \beta$ ，有时将它用作**反应性的基本单位**，单位名称为“元”(\$)，其**定义**为：反应性 $(\$)=\rho/\beta$ ，即把等于缓发中子份额 β 的反应性定义为 1\$ 反应性。

④ ρ_0 为很大负反应性时，稳定周期 T 将接近于 $1/\lambda_1$ ，即约等于 **80s**。

注：依据普通高等教育“十五”国家级规划教材

《核反应堆物理分析》（修订本） （2004年7月第1版）

谢仲生主编 西安交通大学出版社 原子能出版社

其中不包括“第十章—压水堆堆芯燃料管理”章节部分

希望对下载的朋友有所帮助，如有不详尽或错误之处，敬请谅解。

QQ: 1753085618