

元件盒形的热中子利用系数与 热中子通量不均匀性

李兆禔

本文探讨了水水反应堆中把元件棒组成元件盒后的非均匀栅内的热中子利用系数的计算方法,并讨论了元件盒内热中子通量分布的不均匀性。文中提出把热中子利用系数分解为盒内利用系数和元件棒利用系数两个因子。先用扩散理论或多次碰撞理论处理带覆盖层的均匀栅内的热中子利用系数,然后把盒内介质转化成相当的均匀介质,求出整个元件盒内的通量分布,计算盒内利用系数。最后利用所得计算公式计算了一个游泳池反应堆元件盒形的热中子利用系数和通量分布,并与按完全均匀栅计算得到的结果作了比较。

一、引言

目前,对无限均匀栅格内的热中子利用系数,有比较简单而又能得出相当准确结果的理论计算公式^[1,2]。但是对水水反应堆中组成元件盒的非均匀栅格内的热中子利用系数的计算,在一般的文献中则很少涉及到。本文的目的是企图处理元件盒形的热中子利用系数与热中子通量分布。

二、一般讨论

在水水反应堆中的燃料棒常常是组成元件盒的,以截面为正方形的最常见。当燃料棒组成元件盒时,各相邻棒之间距不再保持相等。我们把这种结构称为非均匀栅系统,相应的把各棒间距都相等的结构称为均匀栅系统。前者以元件盒为组成单元,后者以棒为组成单元。当均匀栅系统变为非均匀栅系统并保持同样的水轴体积比时,通量分布和热中子利用系数发生变化。其改变量与原来栅格是否处在最佳栅格与改变后的非均匀性有关。此外,也因引入了盒包壳材料而降低了热中子利用系数。一般的说,这种变化是对临界计算有影响的,故必须考虑这种非均匀性。这里提出的非均匀栅内热中子利用系数计算的基本点如下:先把系统看成是由无限个同样的元件盒组成的,孤立一个元件盒,可把热中子利用系数分解为两部分:

$$\begin{aligned} \text{棒的热中子利用系数} = & \left[\frac{\text{元件盒内部介质每秒吸收的热中子数}}{\text{一个元件盒范围内每秒产生的热中子数}} \right] \times \\ & \times \left[\frac{\text{燃料棒每秒吸收的热中子数}}{\text{元件盒内部介质每秒吸收的热中子数}} \right], \end{aligned}$$

即

$$f_{\text{棒}} = f_{\text{盒内}} \times f_{\text{盒棒}}. \quad (1)$$

这里的盒内介质包括元件盒内由燃料棒所组成的均匀栅所属的所有介质,其余都归于盒外介质。若燃料棒是由燃料和其他稀释材料组成的,则真正热中子利用系数 f 为

$$f = f_{\text{棒}} \times \left[\frac{\text{棒内铀每秒所吸收的热中子数}}{\text{燃料棒每秒所吸收的热中子数}} \right]. \quad (2)$$

现在分别讨论 $f_{\text{盒内}}$ 和 $f_{\text{盒棒}}$ 。

1. 均匀栅的热中子利用系数

计算元件盒内部介质内燃料棒的热中子利用系数 $f_{\text{全棒}}$, 相当于把元件棒所属区域周期地延伸至无限大, 再按一般均匀栅计算热中子利用系数。这里利用两种方法进行计算, 同时考虑了覆盖层的影响。

(1) **多次散射法** 在文献[1]或[2]中所叙述的多次散射方法都忽视了覆盖层的影响。但是在许多情况下, 覆盖层的影响是不能忽略的。这里我们利用文献[1]中所提出的基本假设和处理方法, 并考虑到覆盖层的存在和作用, 获得了利用多次散射方法的推广的计算公式。推导过程如下。

在带覆盖层的情况下, 热中子利用系数 f 有如下关系式:

$$\frac{1-f}{f} = \frac{\Sigma_1 V_1 \bar{\phi}_1 + \Sigma_{A1} V_{A1} \bar{\phi}_{A1}}{\Sigma_0 V_0 \bar{\phi}_0} \quad (3)$$

设在覆盖层中对中子无减速作用, 则单位时间内产生的中子数为 $V_1 q$ 。令 $(1-P_1)$ 为中子根本没有逃出减速剂的几率, 那末 P_1 为中子至少有一次逃出减速剂的几率。如果令 P_{A1} 表示中子逃出减速剂内表面后, 经一次穿透或多次反射, 最终能达到燃料块表面的几率, 那么减速剂中减速的中子打在燃料块表面的中子数为 $V_1 q P_1 P_{A1}$ 。令中子由覆盖层外表面打在覆盖层上, 经覆盖层散射或在对燃料块张角外掠过而返回到减速剂的几率为 R_{A1} , 并令一次透射到燃料块表面的几率为 P_{A1} , 则可以求得

$$P_{A1} = \frac{P_{A1}}{1 - R_{A1}(1 - \Gamma_1)} \quad (4)$$

式中 Γ_1 为中子由减速剂内表面打入而被减速剂吸收的几率。

令 Γ_0 表示中子打在燃料块表面而被燃料块吸收的几率, 则被燃料块吸收的总中子数为

$$V_1 q P_1 P_{A1} \frac{\Gamma_0}{\Gamma_0 + (1 - \Gamma_0) \Gamma'_1} \quad (5)$$

式中 Γ'_1 为中子走出燃料块而被非燃料块吸收的几率。因此, 热中子利用系数为

$$f = \frac{V_1 q P_1 P_{A1} \frac{\Gamma_0}{\Gamma_0 + (1 - \Gamma_0) \Gamma'_1}}{V_1 q} = P_1 P_{A1} \frac{\Gamma_0}{\Gamma_0 + (1 - \Gamma_0) \Gamma'_1} \quad (6)$$

在(6)式中, 除了 P_{A1} 和 Γ'_1 以外, 其余符号的意义与文献[1]的相同。 P_{A1} 已在上面给出, 下面求 Γ'_1 。

按定义, Γ'_1 为中子由覆盖层内表面打入覆盖层后被覆盖层和减速剂吸收的几率,

$$\begin{aligned} \Gamma'_1 &= \Gamma_{A1} + P'_{A1} \Gamma_1 + P'_{A1} (1 - \Gamma_1) R_{A1} \Gamma_1 + P'_{A1} (1 - \Gamma'_1)^2 R_{A1}^2 \Gamma_1 + \dots \\ &= \Gamma_{A1} + \frac{P'_{A1} \Gamma_1}{1 - R_{A1} (1 - \Gamma_1)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: P'_{A1} 为中子由覆盖层内表面打入覆盖层后一次过程中透射到减速剂的几率; Γ_{A1} 和 Γ_1 分别为中子走出燃料块后被覆盖层和减速剂吸收的几率。 Γ_1 和文献[1]中的意义相同。现在求 Γ_{A1} 。在求(5)式时已知, Γ_{A1} 是两部分几率之和。其一, 中子由燃料块走出后打入覆盖层内表面而在一次过程中被覆盖层吸收的几率 Γ_{A10} :

$$\Gamma_{A10} = 1 - P'_{A1} - R_{A1} \quad (8)$$

式中 R'_{A1} 为中子由覆盖层内表面打入时被覆盖层反射的几率。其二, 中子在重新返回燃料块表面之前, 在覆盖层和减速剂中多次穿返过程中被覆盖层吸收的几率:

$$\Gamma_{A11} = \frac{P'_{A1}(1 - \Gamma_1)(1 - R_{A1} - P_{A1})}{1 - (1 - \Gamma_1)R_{A1}} \quad (9)$$

故

$$\Gamma_{A1} = \Gamma_{A10} + \Gamma_{A11} \quad (10)$$

将(7)式和(10)式代入(6)式中,利用文献[1]中的关系式:

$$\Gamma_0 = \frac{4V_0}{S_0} \Sigma_0 P_0 = \bar{i}_0 \Sigma_0 P_0,$$

$$\Gamma_1 = \frac{4V_1}{S_0} \Sigma_1 P_1 = \bar{i}_1 \Sigma_1 P_1,$$

可以得到

$$\frac{1 - \bar{i}}{f} = \frac{\Sigma_1 V_1}{\Sigma_0 V_0} \left\{ \left(\frac{1}{P_0} - \bar{i}_0 \Sigma_0 \right) \left[\frac{\Gamma_{A1}}{\Gamma_1} + \frac{P'_{A1}}{1 - R_{A1}(1 - \Gamma_1)} \right] \frac{1}{P_{A11}} + \frac{\Sigma_0 V_0}{\Sigma_1 V_1} \left(\frac{P_{A11}^{-1} - P_1}{P_1} \right) \right\} \quad (11)$$

由于中子在覆盖层中的穿透几率非常接近于 1, 故在求 Γ_1 时表面积仍取 S_0 .

若没有覆盖层, 则 $P_{A1} = P_{A11} = P'_{A1} = 1$; $R_{A1} = R'_{A1} = 0$; $\Gamma_{A1} = \Gamma_{A10} = \Gamma_{A11} = 0$. 这样, (11)式就可以过渡到

$$\frac{1 - \bar{i}}{f} = \frac{\Sigma_1 V_1}{\Sigma_0 V_0} \left[P_0^{-1} - \bar{i}_0 \Sigma_0 + \frac{\Sigma_0 V_0}{\Sigma_1 V_1} \left(\frac{1 - P_1}{P_1} \right) \right] \quad (11a)$$

这与文献[1]中没有考虑覆盖层影响的公式相同.

在(11)式中的各量, 文献[1]中已给出, 这里为了方便起见, 亦引入之:

$$P_0^{-1} = G + r_0 \Sigma_0,$$

$$G = 1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_{0r}} A \left[1 + \frac{\sigma_{0r}}{\sigma_{0r}} \alpha + \left(\frac{\sigma_{0r}}{\sigma_{0r}} \right)^2 \beta \right],$$

$$P_1^{-1} = 1 + \frac{K_m^2 r_1^2}{2} \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_{A1}^2} \ln \frac{r_1}{r_{A1}} - \frac{3}{4} + \frac{r_{A1}^2}{4r_1^2} \right] + \frac{r_1^2 - r_{A1}^2}{r_{A1}} \Sigma_1 \frac{3}{2} \lambda.$$

上面第三式是在假定燃料块为黑体, 而没有覆盖层的条件下求得的; 当有覆盖层, 燃料块仍假设为黑体时, 减速剂中所吸收的中子等于在减速剂内产生的中子, 根本没有逃出减速剂的几率 $1 - P_1$, 与中子曾逃出减速剂但在覆盖层中多次穿透后最终被减速剂吸收的几率之和, 即

$$\int_{V_1} \Sigma_1 \phi_1(r) dV_1 = (1 - P_1) + P_1 \frac{R_{A1} \Gamma_1}{1 - R_{A1}(1 - \Gamma_1)},$$

故

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_1} \left[1 - \frac{R_{A1} \Gamma_1}{1 - R_{A1}(1 - \Gamma_1)} \right]^{-1} &= 1 + \frac{K_m^2 r_1^2}{2} \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_{A1}^2} \ln \frac{r_1}{r_{A1}} - \frac{3}{4} + \frac{r_{A1}^2}{4r_1^2} \right] \\ &\quad + \frac{r_1^2 - r_{A1}^2}{r_{A1}} \Sigma_1 \frac{3}{2} \lambda. \end{aligned} \quad (12)$$

由于 P_1 中的修正因子很接近于 1, 实际计算中可先忽视该修正因子, 求出 Γ_1 后再求 P_1 .

现在求外推长度 λ . 令覆盖层中的通量分布为

$$\phi_{A1}(r) = A + B \ln \frac{r}{r_0} \quad (13)$$

若燃料块是黑体, 则在覆盖层内表面处的边界条件为

$$\phi_{A1} / \phi'_{A1} = d^{H_2O} \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式中, 可得

$$\phi_{A1}(r) = A \left(1 + \frac{r_0}{d^{H_2O}} \ln \frac{r}{r_0} \right). \quad (15)$$

根据 λ 的意义得

$$\lambda = r_{Al} \left(\frac{d^{H_2O}}{r_0} + \ln \frac{r_{Al}}{r_0} \right). \quad (16)$$

由于覆盖层一般很薄,中子直接穿透的几率很接近于1,故在(14)式中的线性外推距离应以减速剂的中子自由程为准由文献[1]或[2]中的曲线查得;同时在(16)式中不再引入扩散系数比的因子。

当覆盖层很薄(一般是这样的),同时覆盖层的厚度 $t \ll r_0$ 时,则覆盖层中的穿透几率和反射几率的计算问题可以作为平板问题来处理。因为在(11)式中,这些量都是作为修正项引入的,故它们的计算误差不致显著影响热中子利用系数。这样可以大大减少计算工作量,使公式(11)和公式(11a)在计算上的复杂程度相当。

(2) 扩散理论法 利用不作任何修正的扩散理论法求得的热中子利用系数,结果是偏高的。这是由于偏高估计了燃料块内的热中子通量和偏低估计了减速剂内的通量分布^[3]。如果要在扩散理论中也考虑覆盖层,则可利用对数分布来描写覆盖层中的通量分布,并把覆盖层作为一区,利用边界上中子流和通量的连续条件来解扩散方程。再由于燃料块中的自屏因子与外面材料的性质无关,所以可以利用由多次散射理论求得的自屏因子来代替由扩散理论解得的自屏因子。这样,减速剂内的通量由于考虑了覆盖层内的对数函数通量分布而有适当的提高;燃料块内的通量分布由这种代换而有适当的降低。如此获得的热中子利用系数计算公式能给出较满意的结果。按这种方法处理后的热中子利用系数的计算公式如下:

$$\frac{1}{f} = 1 + \frac{\Sigma_1 V_1}{\Sigma_0 V_0} G + \frac{\Sigma_1 V_1}{2\pi D_{Al}} \ln \frac{r_{Al}}{r_0} + \frac{V_1 \Sigma_1 \left[\chi_1(\chi_1 r_{Al}) + \frac{\chi_1}{I_1} (\chi_1 r_1) I_0(\chi_1 r_{Al}) \right]}{\pi r_{Al}^2 \Sigma_1 \left(\frac{2}{\chi_1 r_{Al}} \right) \left[\chi_1(\chi_1 r_{Al}) - \frac{\chi_1}{I_1} (\chi_1 r_1) I_1(\chi_1 r_{Al}) \right] - Al_{\text{吸收}}}, \quad (17)$$

式中

$$G = 1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_{t0}} A \left[1 + \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{t0}} \alpha + \left(\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{t0}} \right)^2 \beta \right];$$

$$Al_{\text{吸收}} = \Sigma_a^{Al} (-1) C'(Al) r_{Al} \left\{ V_{Al} \left(\frac{D_1}{D_0} \right) \left(\frac{2}{\chi_0^2 r_0^2} \right) G + \frac{D_1}{D_{Al}} \left[\frac{r_{Al}^2 \pi t}{r_0} - \frac{V_{Al}}{2} \right] \right\};$$

$$(-1) C'(Al) = \chi_1 \left[\chi_1(\chi_1 r_{Al}) - \frac{\chi_1}{I_1} (\chi_1 r_1) I_1(\chi_1 r_{Al}) \right],$$

其中 t 为覆盖层的厚度。其他符号都是常用的,这里不再说明。

以上所求得的热中子利用系数都是 $f_{\text{盒内}}$ 。

2. 盒内热中子利用系数 $f_{\text{盒内}}$

按定义, $f_{\text{盒内}}$ 就是元件盒内部材料吸收的热中子数与整个盒所有材料吸收的热中子数之比。我们用下面的方法来计算它。首先根据上面的公式计算盒内单位棒栅介质的通量分布,按中子通量权重求出盒内相当均匀介质中的吸收和迁移截面,从而求得盒内相当介质的扩散系数 $D_{\text{盒内}}$ 和扩散长度 $L_{\text{盒内}}$ 。这样,每个元件盒就成为盒内盒外两区。盒内是减速剂和燃料的均匀混合介质,盒外是减速剂和包盒材料。在一般元件盒中,盒内介质的扩散长度比盒的边长小很多(如在 IPT 型反应堆上, $L_{\text{盒内}} \leq 1.4$ 厘米,盒的边长为 7.15 厘米),盒间水隙是不大的,故我们把一个元件盒的两个方向看成是平面交界的半无限介质,如图 1 所示。热中子扩散方

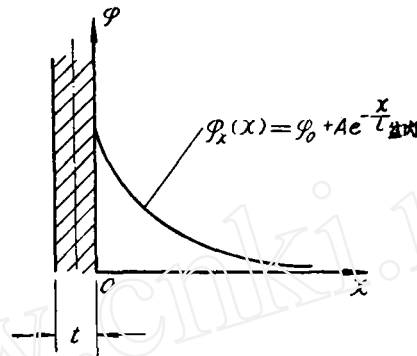


图 1 盒内 X 方向通量分布

程为

$$-D_{\text{盒内}} \nabla_x^2 \phi(X) + \Sigma_{a\text{盒内}} \phi(X) = q_{\text{盒内}}, \quad (18)$$

其解可写成

$$\phi(X) = \phi_0 + A e^{-X/L_{\text{盒内}}}. \quad (19)$$

式中 ϕ_0 为未引入水隙前的中子通量(等于常数)。上式第二项是水隙内减速中子的贡献。在一般水反应堆的元件盒中, $t_{\text{H}_2\text{O}} \ll 2L_{\text{H}_2\text{O}}$, 此时水隙内的通量分布很接近于平的¹⁾。如果认为快中子通量分布是常数, 中子的减速完全由水决定, 那末水隙内的中子减速密度为 $\frac{\nu_{\text{水隙}}}{\nu_{\text{盒内}}} \Sigma_{a\text{盒内}} \phi_0$ 。

如果忽视水隙内的自吸收²⁾, 则由边界处, 源强条件可得

$$A = \frac{t_{\text{H}_2\text{O}}}{2L_{\text{盒内}}} \phi_0 \frac{\nu_{\text{水隙}}}{\nu_{\text{盒内}}}. \quad (20)$$

代入(19)式得

$$\phi(X) = \phi_0 + \phi_0 \frac{t_{\text{H}_2\text{O}}}{2L_{\text{盒内}}} \frac{\nu_{\text{水隙}}}{\nu_{\text{盒内}}} e^{-\frac{X}{L_{\text{盒内}}}}, \quad (21)$$

式中 ν_i 为 i 介质内水所占的体积比。同样可求得 Y 方向的分布。因此盒内任何一点 (X, Y) 的通量分布为

$$\phi(X, Y) = \phi_0 + \phi_0 \frac{t_{\text{H}_2\text{O}}}{2L_{\text{盒内}}} \frac{\nu_{\text{水隙}}}{\nu_{\text{盒内}}} \left\{ \left[e^{-\frac{X}{L_{\text{盒内}}}} + e^{-\frac{d-X}{L_{\text{盒内}}}} \right] + \left[e^{-\frac{Y}{L_{\text{盒内}}}} - e^{-\frac{d-Y}{L_{\text{盒内}}}} \right] \right\}, \quad (22)$$

式中 d 表示盒内均匀栅所占面积的边长。上式表示盒内任何一点的通量等于盒内通量与由盒四周水隙内减速中子通量的贡献之和。而水隙内一方向的通量值分别为 ϕ_{0x} 和 ϕ_{0y} 。以上设想亦见于文献[6]中。

这样一来, 盒内热中子利用系数为

$$f_{\text{盒内}} = \frac{\int_{s_{\text{盒内}}} \Sigma_{a\text{盒内}} \phi(X, Y) ds_{XY}}{\int_{s_{\text{盒内}}} \Sigma_{a\text{盒内}} \phi(X, Y) + \sum_i \int \Sigma_{ai} \phi_i ds_i}. \quad (23)$$

1) 水隙中心处通量与水隙边界处通量之差 $\approx \left(\frac{t_{\text{H}_2\text{O}}}{2L_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^2$ 。

2) 在此处理中把 X 和 Y 两方向分离, 并认为两方向水隙是无关的。实际上, 两方向水隙的相互作用使交叉处水隙内通量提高。忽视自吸收或多或少地与两方向孤立处理相补偿。

式中 \sum_i 表示对包括盒外介质的所有吸收之和。(23)式可以积分得出解析式,但这里不再写出了。

三、计算结果与讨论

为了验证公式(11)和(17)的适用性,我们选择文献[5]所公布的几种测量试验方案,分别利用(11)和(17)式进行了计算,将所得结果列于下表。计算中所用截面常数和修正值都采用文献[4]中所给出的。从此表可以看出,除第四种情况略超过所给的试验误差以外,其余的热中子利用系数都在试验误差以内。

表1 计算结果

燃料棒直径, 英寸	加波度, %U ²³⁵	UO ₂ 密度, 克/厘米 ³	水铀比 S _{H₂O} /S _{UO₂}	热中子利用系数		
				试测结果	多次散射法 [公式(11)]	修正扩散法 [公式(17)]
0.384	1.294	10.53	2.40	0.809±0.004	0.8071	0.8115
0.384	1.294	10.53	1.42	0.874±0.004	0.8701	0.8749
0.384	1.294	7.53	1.73	0.807±0.004	0.8058	0.8077
0.600	1.294	7.53	1.07	0.873±0.004	0.8651	0.8687

利用公式(17)与(23)计算了IPT游泳池反应堆的热中子利用系数,结果为

$$f_{\text{盒内}} = 0.95238, f_{\text{盒外}} = 0.84123^*, f = 0.80117,$$

其中符号*表示该数据是燃料的。

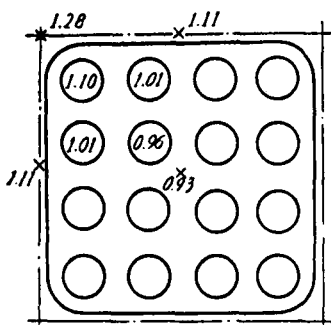


图2 元件盒中热中子通量的不均匀性分布

如果把盒外和包盒铝材料均匀地加入盒内减速剂中,按均匀栅系统计算,利用公式(17)得到 $f = 0.81318$,两者之差约为1%。可以相信,前者会更接近于实际测量值。

计算得到的IPT游泳池反应堆的元件盒内各点的通量分布如图2所示。图中写在元件棒处的数字是指对该元件棒单元栅平均后的通量。计算结果:元件盒中最大的与最小的热中子通量比值为1.37;各元件棒间最大发热量与最小发热量之比为1.14;元件棒最大发热量与平均的发热量之比为1.08;元件棒最小发热量与平均发热量之比为0.94;最大发热处是在四角的元件棒上;最小发热处是在中心的四根元件棒上。

本文承阮可强同志提供许多宝贵的意见,谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. Amouyal and P. Benoist, New Method of the Determination of the Thermal Utilization Factor of a Cell, CEA-571 (1956).
- [2] A. Д. Галанин, О вычислении коэффициента теплового использования, Нейтронная физика, 1961.
- [3] A. M. Weinberg and E. P. Wigner, The Physical Theory of Neutron Chain Reactors, 1959.
- [4] ANL-5800, Reactor Physics Constants (1963).
- [5] D. Klein et al., Nucl. Sci. and Eng., 3, 403 (1958).
- [6] R. W. Deutsch, Nucleonics, 1, No. 6, 95 (1958).

(编辑部收稿日期1965年3月4日)