

复杂几何燃料组件的共振自屏计算

黄伟兵, 吴宏春

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要:共振参数计算是反应堆堆芯设计计算中的重要内容,传统的共振计算模型只适应于简单几何计算。本工作应用 A. Hebert 提出的子群共振自屏计算模型研制了复杂几何燃料组件的共振自屏计算程序。该程序能处理含有两种共振核素的复杂几何下的共振自屏。对一系列问题的数值校验计算表明,该模型在低富集度时具有较好的计算精度。

关键词:共振;子群;复杂几何;自屏

中图分类号: TL503.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)10-0911-05

Resonance Self-shielding Calculation for Complicated Fuel Assembly

HUANG Wei-bing, WU Hong-chun

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Resonance self-shielding calculation is a very important part of the reactor core design calculation. The traditional self-shielding model can only simulate the simple geometry. The subgroup self-shielding model developed by A. Hebert was utilized to develop a self-shielding calculation code. It can treat complicated geometry with two resonant isotopes contained in fuel region. Numerical results presented for many problems show that this model can get high accurate results when the fuel enrichment is low.

Key words: resonance; subgroup; complicated geometry; self-shielding

共振自屏计算是反应堆堆芯设计计算中的一个重要环节。该计算的主要目的是得到共振核素在共振能群中的自屏截面(共振能群的平均截面),以为求解多群中子输运方程提供截面参数。在目前的组件计算程序中,均包含自屏计算模块,以用来考虑各组能群下微观截面的共振行为。

目前,国际上共振自屏计算的方法与模型可归结为两大类:1)子群方法^[1];2)基于稀释

截面的等价理论^[2]。国际上著名的商用组件计算程序 WIMSD4.1^[3]及西安交通大学为秦山核电厂开发的 TAPME 程序^[4]中包含的自屏模型均基于等价理论模型。但这些模型只能处理简单几何的共振自屏计算,如单棒栅元几何或平板几何等,对于整个组件的计算则需引进丹可夫因子进行修正。传统的共振自屏模型不能用于同时含多种共振核素时复杂几何的燃料组件自屏计算,而目前国内对复杂几何燃料组

件的自屏计算研究尚处于空白状态。

本工作应用的是子群方法。该方法可用于复杂几何燃料组件的自屏计算,能够处理同时含两种共振核素的自屏问题^[5]。计算结果表明,该方法在处理含两种共振核素的复杂几何共振自屏问题时具有优越性。因此,利用该方法对先进反应堆燃料组件的设计计算,特别是对使用混合氧化物燃料的反应堆设计具有重要意义。

1 自屏计算模型

对于空间具有 I 个区域的问题,根据各区碰撞概率的关系,把空间区域归并为燃料区(共振区)与慢化区。燃料区用下标 f 表示,慢化区用下标 m 表示。

燃料区内某共振核素的 ρ 反应截面定义为:

$$\bar{\sigma}_\rho(g) = \frac{\langle \sigma_\rho \varphi_f(u) \rangle_g}{\varphi_f(u)} \quad (1)$$

式中: $\varphi_f(u)$ 为燃料区的能量精细结构函数。

对空间具有 I 个区问题的精细结构方程^[6],应用 Livolant-Jeanpiere 近似,再根据各区之间碰撞概率关系,对共振能群积分平均得:

$$\varphi_f(u) = \langle p_{ff} \rangle_g Q_f(g) + \langle p_{fm} \rangle_g \Sigma_m^+(g) \quad (2)$$

$$\langle \sigma_\rho \varphi_f \rangle_g = \langle \sigma_\rho p_{ff} \rangle_g Q_f(g) + \langle \sigma_\rho p_{fm} \rangle_g \Sigma_m^+(g) \quad (3)$$

其中: $Q_f(g)$ 为燃料区第 g 群的慢化源项。

$$Q_f(g) = \Sigma_f^+(g) + \sum_{h=1}^G \frac{\Delta u_h}{\Delta u_g} [\langle \Sigma_{s,f}^* p_{ff} \rangle_{g \leftarrow h} Q_f(h) + \langle \Sigma_{s,f}^* p_{fm} \rangle_{g \leftarrow h} \Sigma_m^+(h)] \quad (4)$$

$$\langle \sigma_\rho p_{ff} \rangle_g = \frac{1}{\Delta u_g} \int_{u_{g-1}}^{u_g} \sigma_\rho p_{ff}(u) du \quad (5)$$

式中: $\langle \sigma_\rho p_{fm} \rangle_g$ 和 $\langle p_{ff} \rangle_g$ 表达式与式(5)类似, p_{ff} 为中子从燃料区到燃料区的首次碰撞的比率概率, p_{fm} 为中子从慢化区到燃料区的首次碰撞的比率概率,以上各式中其余各物理量的意义见参考文献^[6]。

因此,根据式(1)求解共振能群自屏截面的问题则归结为一系列能群积分平均值的求取。应用子群概率表即可求出这些积分平均值。

2 子群概率表

子群概率表实际上是一些基本点和与之相对应的权重系数的集合。其主要作用是计算本

自屏模型中出现的一系列能群的积分平均值。以计算 $\langle \sigma_\rho p_{ff} \rangle_g$ 为例,与广义 Stamm'ler 方法^[6]相同,假设燃料到燃料的碰撞比例概率可被展开成 3 项有理式:

$$p_{ff}(u) = \sum_{n=1}^3 \frac{\alpha_n(g)}{\Sigma_f^*(u) + \Sigma_{e,n}(g)} \quad (6)$$

其中: $\Sigma_{e,n}(g)$ 是宏观稀释截面; $\sum_{n=1}^3 \alpha_n(g) = 1$ 。

将 $p_{ff}(u)$ 代入 $\langle \sigma_\rho p_{ff} \rangle_g$ 得:

$$\langle \sigma_\rho p_{ff} \rangle_g = \sum_{n=1}^N \alpha_n(g) \left\langle \frac{\sigma_\rho}{\Sigma_f^*(u) + \Sigma_{e,n}(g)} \right\rangle_g = \frac{1}{\Delta u_g} \int_{u_{g-1}}^{u_g} \frac{\sigma_\rho(u)}{\Sigma_f^*(u) + \Sigma_{e,n}(g)} du \quad (7)$$

式(7)右边的积分形式是 Riemann 积分,该式的特点是分子为任意一个有共振特性的量,而分母是 $\Sigma_f^*(u)$ 与一个常量的和。将 Riemann 积分形式替换成 Lebesgue 积分的形式。在 Lebesgue 积分中,其积分变量是共振核素的微观总截面。这样,Lebesgue 积分的数目就与燃料区内共振核的种类数相同,式(7)就可直接利用子群参数求得。

当燃料区内仅有一个共振核时,设该核的核子密度为 N^* ,那么, $\Sigma_f^*(u) = N^* \sigma(u)$ 。

$$\left\langle \frac{\sigma_\rho}{\Sigma_f^*(u) + \Sigma_{e,n}(g)} \right\rangle_g = \sum_{k=1}^K \frac{\sigma_{\rho,k}}{N^* \sigma_k + \Sigma_{e,n}} \omega_k \quad (8)$$

当含有两种共振核时,分别用下标 x, y 表示,核子密度分别为 N_x, N_y ,那么, $\Sigma_f^*(u) = N_x \sigma_x(u) + N_y \sigma_y(u)$ 。

$$\left\langle \frac{\sigma_{\rho,x}}{\Sigma_f^*(u) + \Sigma_{e,n}(g)} \right\rangle_g =$$

$$\sum_{k=1}^{K_x} \sum_{l=1}^{K_y} \frac{\sigma_{\rho,x,k}}{N_x \sigma_{x,k} + N_y \sigma_{y,l} + \Sigma_{e,n}} \omega_{x,k} \omega_{y,l} \quad (9)$$

式(9)中的 $\sigma_{\rho,x}$ 表示共振核 x 的 ρ 反应的微观截面。式(8)、(9)中的系数 $(\omega_k, \sigma_{\rho,x,k}, \sigma_k)$ 构成子群概率表,可通过从核数据库中提供的不同稀释截面下的自屏截面值计算得到,方法详情参见参考文献^[5]。各物理量意义见参考文献^[6]。

3 数值校验

利用子群共振自屏模型编制了程序,并代替了 Dragon 程序^[7]中的广义 Stamm'ler 自屏计算模型,从而形成 Dragon-Sg 程序。为了验

证子群共振自屏模型的正确性及比较该模型与广义 Stamm'ler 自屏模型的优缺点,本文用新编制的程序 Dragon-Sg 计算了 Mosteller 基准问题及一系列复杂几何燃料栅元问题。

3.1 Mosteller 基准题

Mosteller 基准题几何图如图 1 所示。两个圆环半径依次为 0.393 06 和 0.458 06 cm,正方形边长为 1.262 09 cm。由内到外各区的材料依次为燃料、包壳及冷却剂。各区材料成分列于表 1。表 2 列出了 Dragon-Sg 程序的计算结果。从计算结果可看出,子群模型的计算结果与参考值吻合良好,具有较好的精度。

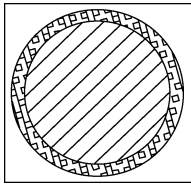


图 1 Mosteller 基准题几何图

Fig. 1 Sketch of Mosteller benchmark

3.2 燃料棒栅元及 3×3 燃料组件问题

图 2 示出了燃料棒栅元及 3×3 燃料组件。燃料棒栅元由内向外各圆环半径依次为 3 930.6、4 580.6、7 120.6 μm,由内向外的各区材料依次为燃料、包壳、冷却剂。各区材料成分列于表 3。

3×3 燃料组件中单个燃料栅元由内向外各圆环半径依次为 3 930.6、4 580.6 μm,正方形栅元边长为 12 620.9 μm,含水洞 3×3 燃料组件中央栅元为水洞栅元,其最内区材料为冷却剂。

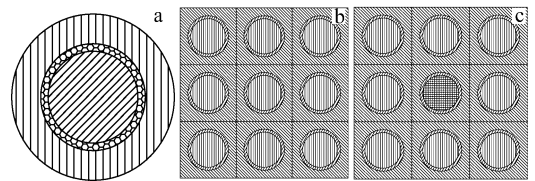


图 2 燃料棒栅元及组件

Fig. 2 Fuel rod cell and assemblies

a——燃料棒栅元;b——3×3 燃料组件;
c——含水洞 3×3 燃料组件

表 1 Mosteller 基准题燃料、包壳及冷却剂中各核素浓度

Table 1 Isotopes concentration for Mosteller benchmark

各区材料	²³⁵ U 富集度/%	燃料温度/K	10 ⁻³⁴ 核子浓度/m ⁻³					
			¹ H	⁹¹ Zr	¹¹ B	¹⁶ O	²³⁵ U	²³⁸ U
燃料	0.711	600				461.309	1.660 78	228.994
		900				457.561	1.647 29	227.133
	1.6	600				461.355	3.737 29	226.940
		900				457.607	3.706 93	225.096
2.4	600	600				461.397	5.605 88	225.093
		900				457.648	5.560 33	223.264
包壳		600		389.087				
冷却剂		600	442.326		0.513 231	221.163		

表 2 Mosteller 基准题的特征值

Table 2 Eigenvalue for Mosteller benchmark

²³⁵ U 富集度/%	燃料温度/K	包壳与慢化剂温度/K	Dragon-Sg 值	参考值 ^[8]	计算值与参考值的相对偏差/%
0.711	600	600	0.661 865	0.663 8	-0.291 5
	900	600	0.653 743	0.656 7	-0.450 3
1.6	600	600	0.959 734	0.958 1	0.170 5
	900	600	0.948 817	0.948 4	0.044 0
2.4	600	600	1.101 836	1.096 1	0.523 3
	900	600	1.092 300	1.086 4	0.543 1

用 Dragon-Sg 程序计算了上述 3 个问题中燃料区只含单种共振核²³⁵U 或²³⁹Pu 及含两种共振核素的情况,计算结果列于表 4。从表 4 可看出,当燃料区内只含单种共振核素时,子群模型与广义 Stamm'ler 模型具有同等精度。当燃料区内同时含有两种共振核素时,以 MCNP 程序计算结果为参考,应用子群模型所计算的结果更接近于参考值。因广义 Stamm'ler 模型只能处理单种共振核素的自屏问题,对于同时包含多种共振核素的问题,该模型只能假设其他共振核为非共振核,然后迭代求解,而子群模型则无这一假设。这也表明了子群模型在处理同时包含多种共振核素问题的优越性。

3.3 六角形组件问题

六角形组件示意图示于图 3。燃料栅元内各圆环由内向外的半径依次为 0.412 282、0.475 917 cm,每个六角形栅元的边长为 0.707 297 cm。燃料栅元由内向外的各区的材料为燃料、包壳、冷却剂。图 3b 中最中央栅元为可燃毒物栅元。可燃毒物栅元内各圆环由内向外的半径依次为 0.436、0.486、0.612 5 cm。设可燃毒物栅元由内向外的各区的材料分别为材料 1、2、3、4。各材料成分列于表 5。

本问题的计算结果列于表 6。从表 6 给出的结果同样可以看出,当燃料区含有两种共振核素时,子群模型比广义 Stamm'ler 模型具有更好的计算精度,同时也可看出该理论模型对复杂几何的适应能力。

表 3 各种组合情况下燃料棒、包壳及冷却剂中各核素浓度
Table 3 Isotopes concentration of fuel rod, cladding and coolant

各区材料	温度/K	10 ⁻³⁴ 核子浓度/m ⁻³						
		¹ H	⁹¹ Zr	¹¹ B	¹⁶ O	²³⁵ U	²³⁹ Pu	²³⁸ U
含单种共振核素燃料棒	933.6				465	7.06	7.06	
含两种共振核素燃料棒	933.6				465	7.06	7.06	2 254
包壳	579.9		383.243					
冷却剂	579.9	442.326		0.102 133	221.163			

表 4 各个问题的特征值
Table 4 Eigenvalue for different problems

燃料区	栅元或组件	不同程序计算特征值 MCNP			
		Dragon	Dragon-Sg	MCNP	Dragon 值与 Dragon-Sg 值的相对偏差/%
只含 ²³⁵ U	燃料棒栅元	1.775 569	1.775 081		0.027 48
	3×3 燃料组件	1.775 403	1.774 915		0.027 49
	含水洞 3×3 燃料组件	1.747 676	1.747 265		0.023 517
只含 ²³⁹ Pu	燃料棒栅元	1.757 906	1.757 062		0.048
	3×3 燃料组件	1.757 87	1.757 026		0.048
	含水洞 3×3 燃料组件	1.746 89	1.746 14		0.042 9
同时含 ²³⁵ U 和 ²³⁸ U	燃料棒栅元	1.278 166	1.292 57	1.382 86	
	3×3 燃料组件	1.278 245	1.327 546	1.352 19	
	含水洞 3×3 燃料组件	1.294 949	1.329 897	1.366 44	
同时含 ²³⁹ Pu 和 ²³⁸ U	燃料棒栅元	1.347 375	1.362 938	1.440 32	
	3×3 燃料组件	1.347 493	1.396 853	1.405 59	
	含水洞 3×3 燃料组件	1.376 484	1.411 799	1.422 43	

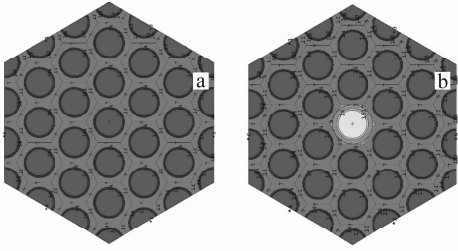


图3 不含毒物(a)和含可燃毒物(b)六角形组件
Fig.3 Hexagonal assembly
without poison cell (a) and with poison cell (b)

表5 各种材料中的核素浓度

Table 5 Isotopes concentration of materials

各区材料	温度/K	10^{-30} 核子浓度/ m^{-3}							
		1H	^{91}Zr	^{52}Cr	^{113}Cd	^{109}Ag	^{58}Ni	^{115}In	^{56}Fe
燃料	933.6								
材料1	579.9				$2.624\ 93 \times 10^{-3}$	$4.491\ 88 \times 10^{-2}$		$7.574\ 64 \times 10^{-3}$	
材料2	579.9			$1.527\ 02 \times 10^{-2}$			$7.514\ 18 \times 10^{-3}$		$5.576\ 70 \times 10^{-2}$
材料3	579.9	$3.064\ 66 \times 10^{-2}$	$1.495\ 80 \times 10^{-2}$	$2.697\ 69 \times 10^{-5}$					$5.274\ 85 \times 10^{-5}$
材料4	579.9	$4.652\ 92 \times 10^{-2}$	$8.924\ 27 \times 10^{-4}$	$4.799\ 27 \times 10^{-5}$			$1.135\ 21 \times 10^{-4}$		$4.458\ 45 \times 10^{-5}$
包壳	579.9			$7.072\ 91 \times 10^{-5}$					$1.382\ 98 \times 10^{-4}$
冷却剂	579.9	$4.713\ 46 \times 10^{-2}$	$4.183\ 72 \times 10^{-4}$	$2.249\ 91 \times 10^{-5}$			$5.321\ 88 \times 10^{-5}$		$2.090\ 13 \times 10^{-5}$

各区材料	温度/K	10^{-30} 核子浓度/ m^{-3}						
		^{55}Mn	^{27}Al	^{95}Mo	^{11}B	^{16}O	^{235}U	^{238}U
燃料	933.6					4.65×10^{-2}	$0.040\ 6 \times 10^{-2}$	2.254×10^{-2}
材料1	579.9							
材料2	579.9	$8.029\ 43 \times 10^{-4}$						
材料3	579.9				$1.530\ 77 \times 10^{-5}$	$1.532\ 33 \times 10^{-2}$		
材料4	579.9	$4.159\ 01 \times 10^{-7}$	$2.352\ 31 \times 10^{-6}$	$4.037\ 55 \times 10^{-6}$	$2.327\ 61 \times 10^{-5}$	$2.326\ 46 \times 10^{-2}$		
包壳	579.9					$2.873\ 35 \times 10^{-4}$		
冷却剂	579.9	$1.949\ 76 \times 10^{-7}$	$1.102\ 77 \times 10^{-6}$	$1.892\ 81 \times 10^{-6}$	$2.355\ 98 \times 10^{-5}$	$2.356\ 73 \times 10^{-2}$		

表6 六角形组件特征值

Table 6 Eigenvalue for hexagonal assembly

问题类型	不同程序计算的特征值		
	Dragon	Dragon-Sg	MCNP
不含可燃毒物	1.045 238	1.094 226	1.25 930
含可燃毒物	0.855 234	0.890 196	0.887 15

参考文献:

[1] POWNEY D J, NEWTON T D. Overview of the WIMS 9 resonance treatment[R]. [S. l.]: Winfrith Technology Centre, 1994.
 [2] 吴宏春, 咸春宇. 核反应堆燃料管理与优化[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
 [3] JOUBERT W R. Review report for WIMSD 4.1 [R]. [S. l.]: Atomic Energy Corporation of South Africa, 1988.

4 结论

应用子群共振自屏模型编制了计算程序 Dragon-Sg, 并通过大量数值校验, 表明该自屏模型能适应复杂几何的共振自屏计算。在处理包含两种共振核素的问题时, 该模型比广义 Stamm'ler 模型具有更高的精度。但当燃料富集度高于 3% 时, 计算结果变差。这显示出了该法对共振核核子浓度的敏感性及其局限性。

[4] 曹良志. TAPME 理论手册[CP]. 西安: 西安交通大学核能系, 2003.
 [5] HEBERT A. Advances in the development of a subgroup method for the self-shielding of resonant isotopes in arbitrary geometries[J]. Nucl Sci Eng, 1997, 126: 245.
 [6] HEBERT A, MARLEAU G. Generalization of the Stamm'ler method for the self-shielding of resonant isotopes in arbitrary geometries [J]. Nucl Sci Eng, 1991, 108: 230.
 [7] MARLEAU G, HEBERT A, ROY R. A user guide for Dragon[CP]. Montreal: Ecole Polytechnique de Montreal, 2000.
 [8] 巨海涛. 基于最小二乘有限元方法的中子输运方程离散纵标解法及加速算法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.