

# 用于 TRIGA 堆计算的 WIMS-D/4 核数据库的评价\*

陈 伟 谢仲生

江新标 陈 达

(西安交通大学 西安 710049)

(西北核技术研究所 西安 710024)

**摘 要** 分别应用 NJOY 和 GASKET 程序将 ZrH 中 H、<sup>166</sup>Er 和 <sup>167</sup>Er 核素的 69 群微观截面补充到 WIMS 程序的核数据库中,形成了用于 TRIGA 堆计算的 WIMS-CNDC 库和 WIMS-NINT 库. 为了评价这两个核数据库是否正确,将它们与国际上通用的 TRIGA 堆计算库 WIMS-IJS 作了比较,验证了氢化锆中氢的声子特征;采用上述三种库分别计算了 TRIGA 堆燃料栅元(标准-8.5 燃料元件、标准 12 燃料元件、LEU 燃料元件和 FLIP 燃料元件)的群常数、倍增因子随燃耗的变化以及燃料的负温度系数,并对结果进行了分析比较. 结果表明,WIMS-CNDC 库和 WIMS-NINT 库适用于 TRIGA 堆的计算.

**关键词** TRIGA 堆 WIMS-D/4 核数据库

**分类号** TL329.7

## 1 引 言

TRIGA 堆是一种以氢化锆与浓缩铀均匀混合物为燃料的固有安全性很高的研究堆,在世界各地共有六十多座. 根据含铀量、浓缩度和是否包含可燃毒物,RTIGA 堆燃料元件通常分为标准型(含铀量为 8.5%和 12%)、LEU 型和 FLIP 型三种,见表 1. 其中,LEU 和 FLIP 含有可燃毒物钷.

表 1 TRIGA 堆不同类型燃料元件参数

名 称	标准-8.5	标准-12	LEU	FLIP
铀含量(w/o)	8.5	12	20	8.5
铀氢锆重(g)	2 244.3	2 360	2 462	2 258.7
富集度	20	20	20	70
H : Zr 比	1.67	1.65	1.57	1.65
<sup>235</sup> U 重(g)	37.9	55.0	97.8	134.2
Er 含量(w/o)			0.44	1.53

在 TRIGA 堆中对中子起慢化作用的除慢化剂外,燃料氢化锆中的氢也起重要作用,特别是它与水中氢的热群散射机理完全不

致. 在氢化锆晶格中,每一氢原子居于由四个锆原子形成的四面体的中心. 当热中子与之相互作用时,有可能激发晶体的振动态,这种振动态的量子称为声子,因此热中子与氢核的散射必须考虑氢的束缚状态,即氢化锆的声子谱模型<sup>[1]</sup>,而不能用描述水中氢的热化特性的尼尔金模型.

TRIGA 堆的 FLIP 和 LEU 燃料元件中含可燃毒物钷,与铀氢锆燃料均匀混合,燃料利用温度致硬谱,通过与钷低能共振(0.5eV)降低反应性,故计算 FLIP 和 LEU 燃料元件的能谱和群常数时必须考虑钷的作用.

国外 TRIGA 堆堆芯分析曾用散射核程序 SUMMIT,该程序是根据分布频谱模型编制的. 该模型用光学模型描述中子与束缚原子核的能量交换,用声学模型处理中子与晶体的能量转移<sup>[2]</sup>. 但这是早期开发的程序,现在已基本不使用. 文献[3]根据氢化锆的热运动频谱(即声子谱理论)编制了氢化锆晶体散射核计算程序 STK. 该程序包括氢化锆权重声子谱、散射双微分截面和积分截面以及散

射核计算等内容. 但该程序在国际上不通用. 目前国际上应用得到广泛验证和应用的带有 69 群核数据库的栅元程序 WIMS-D/4 计算 TRIGA 堆.

WIMS-D/4 是目前国际上比较通用的一种栅元计算程序<sup>[4]</sup>, 它适用于多种堆的能谱计算. WIMS-D/4 程序原带的多种核素的 69 群 WIMS-D/4 数据库, 并不含有 TRIGA 堆燃料元件中用到的几种特殊核素: 氢化锆中 H、<sup>166</sup>Er 和 <sup>167</sup>Er. 因此在把 WIMS-D/4 应用于铀氢锆脉冲堆栅元计算之前, 首先必须对 WIMS-D/4 的 69 群常数库加以补充, 使其含有氢化锆中氢、毒物钼等核素的群常数.

为此, 南斯拉夫斯洛文尼亚 J. Stefan 研究所应用 ENDF/B-V 和 ENDF/B-III 散射律库生成了 ZrH 中 H 的数据, 从 ENDF/B-IV 裂变产物库得到 Er 的数据, 从 ENDF/B-V

裂变产物库得到 Sm 的数据, 把所得到数据并到 WIMS-D/4 库中, 从而形成了 WIMS-IJS 库, 并已成功地应用于铀氢锆堆的计算, 在国际上得到公认<sup>[5]</sup>.

为了应用 WIMS-D/4 程序计算 TRIGA 堆, 文中应用氢化锆的声子谱模型(Deby 谱)和光子模型(Gauss 谱)给出了频谱分布函数  $\rho(\omega)$ , 由 gasket 程序计算氢化锆中氢的散射律  $S(\alpha, \beta)$ , 由自编的 SMP 程序计算了氢化锆中氢的散射矩阵, 补充到 WIMS-D/4 库中, 形成了 WIMS-NINT 库<sup>[6]</sup>. 同时利用 NJOY 程序, 由 WIMS/B-IV 库制备了 ZrH 中 H 及 Er 等元素的 69 群群常数, 并把它并到 WIMS-D/4 的核数据库中, 形成了 WIME-CNDC 库. 但它们都还没有应用于 TRIGA 堆的栅元计算, 因此需对它们进行评估, 表 2 给出了上述三种库的比较.

表 2 用于 TRIGA 堆栅元计算的三种 WIMS-D/4 库

名 称	WIMS-NINT				WIMS-CNDC					WIMS-IJS				
增加的核素	ZrH 中 H (0~0.5eV)				ZrH 中 H (0~0.5eV)					ZrH 中 H (0~0.5eV)				
					<sup>166</sup> Er					<sup>166</sup> Er				
					<sup>167</sup> Er					<sup>167</sup> Er				
										<sup>149</sup> Sm				
ZrH 中 H 散射矩阵 列表温度(K)	296	400	500	600	296	400	500	600	1 000	296	400	600	1 000	
<sup>166</sup> Er 和 <sup>167</sup> Er 散射矩阵 列表温度(K)					300	600	900				300			

由于制作库时所采用的模型或采用的基本数据库不一致, WIMS-D/4 的 69 群截面库会有差别. 为了保证 TRIGA 堆栅元能谱和群常数计算的准确性, 文中对 WIMS-CNDC 库和 WIMS-NINT 库进行评价, 将它们与 WIMS-IJS 库作了比较分析. 首先比较了 300K 时氢化锆中氢的热群散射截面随能量的变化关系, 其次分别计算了 TRIGA 堆几种常用燃料元件栅元的群常数、 $K_{\infty}$  随燃耗

的变化曲线以及燃料栅元的负温度系数.

## 2 用于 TRIGA 堆计算的 WIMS 核数据库的评价

### 2.1 氢化锆中氢的散射截面

图 1 给出了 WIME-NINT、WIMS-CNDC 和 WIMS-IJS 三种库中温度为 300K 时氢化锆中氢的热群散射截面随能量的变化曲线. 从图中可看出, 三条曲线在中子能量为

0.16eV 和 0.30eV 附近有两个峰,这表明由于声子( $\hbar\omega_0=0.137\text{eV}$ )的作用,使得散射截面在低能处( $<0.5\text{eV}$ )不是光滑的下降,而是出现一些反映声子现象的峰值.此外,三

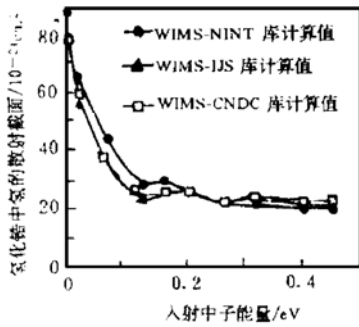


图 1 300K 时不同库中氢化锆中氢的散射截面随能量的变化曲线

条曲线在中子能量趋于零时,氢化锆中氢的散射截面接近于完全束缚的氢原子截面( $80 \times 10^{-24}\text{cm}^2$ ),而当能量较高时,三条曲线又趋近于完全自由的氢原子散射截面( $20 \times 10^{-24}\text{cm}^2$ ).几条曲线的变化趋势基本一致.都表现出了氢化锆中氢的声子特征,并与文献[6]上的数据相符合.

### 2.2 栅元两群群常数的计算

分别用 WIMS-NINT、WIMS-CNDC 和 WIMS-IJS 三种库由 WIMS-D/4 栅元程序计算了 TRIGA 堆标准-8.5、LEU 型燃料栅元的两群群常数,其结果如表 3 和 4 所示.

表 3 零能耗下 WIMS-NINT、WIMS-CNDC 和 WIMS-IJS 三种库计算的标准-8.5 燃料栅元的两群群常数

名称	能群	WIMS-NINT 库计算值①	WIMS-CNDC 库计算值②	WIMS-IJS 库计算值③	③与②的相对 误差(%)	③与①的相对 误差(%)
$D$	1	$9.567505 \times 10^{-1}$	$9.567147 \times 10^{-1}$	$9.754338 \times 10^{-1}$	1.92	1.92
	2	$1.940501 \times 10^{-1}$	$2.160656 \times 10^{-1}$	$2.179296 \times 10^{-1}$	0.86	10.96
$\sum_a$	1	$5.421789 \times 10^{-3}$	$5.421829 \times 10^{-3}$	$5.412339 \times 10^{-3}$	-0.18	-0.17
	2	$7.578061 \times 10^{-2}$	$7.551519 \times 10^{-2}$	$7.634490 \times 10^{-2}$	1.09	0.74
$\sum_{rem}$	1	$3.950242 \times 10^{-2}$	$3.950214 \times 10^{-2}$	$3.920429 \times 10^{-2}$	-0.76	-0.76
	2	$2.026034 \times 10^{-4}$	$2.025059 \times 10^{-4}$	$2.065679 \times 10^{-4}$	1.97	1.92
$\gamma \sum_f$	1	$3.436219 \times 10^{-3}$	$3.436326 \times 10^{-3}$	$3.418371 \times 10^{-3}$	-0.53	-0.52
	2	$1.118208 \times 10^{-1}$	$1.116017 \times 10^{-1}$	$1.131471 \times 10^{-1}$	1.37	1.17

表 4 零能耗下 WIMS-NINT、WIMS-CNDC 和 WIMS-IJS 三种库计算的 LEU 燃料栅元的两群群常数

名称	能群	WIMS-CNDC 库计算值	WIMS-IJS 库计算值	相对误差(%)
$D$	1	$9.688240 \times 10^{-1}$	$9.875642 \times 10^{-1}$	1.9
	2	$2.293281 \times 10^{-1}$	$2.306918 \times 10^{-1}$	0.59
$\sum_a$	1	$1.030174 \times 10^{-2}$	$1.064396 \times 10^{-2}$	3.22
	2	$1.597473 \times 10^{-1}$	$1.612801 \times 10^{-1}$	0.95
$\sum_{rem}$	1	$3.364058 \times 10^{-2}$	$3.305694 \times 10^{-2}$	-1.77
	2	$4.217117 \times 10^{-4}$	$4.281846 \times 10^{-4}$	1.51
$\gamma \sum_f$	1	$8.191244 \times 10^{-3}$	$8.112852 \times 10^{-3}$	-0.97
	2	$2.307449 \times 10^{-1}$	$2.324990 \times 10^{-1}$	0.75

由表 3 和 4 可知,三种库所计算的四种燃料栅元的两群群常数基本一致.但 WIMS-

NINT 库与 WIMS-CNDC、WIMS-IJS 库所计算的标准-8.5 燃料栅元的热群扩散系数

误差稍大.这是因为在生成 WIMS-NINT 库的过程中由 SMP 计算氢化锆中氢的非弹散射时忽略了氢化锆晶体的扩散运动以及在计算弹性散射矩阵时采用了近似模型,因而带来较大的误差,见文献[5].

### 2.3 $K_{\infty}$ 随燃耗的变化曲线

图 2 和 3 分别给出了用三种库所计算的 TRIGA 堆标准-12、FLIP 型燃料栅元的  $K_{\infty}$ 随燃耗的变化曲线.

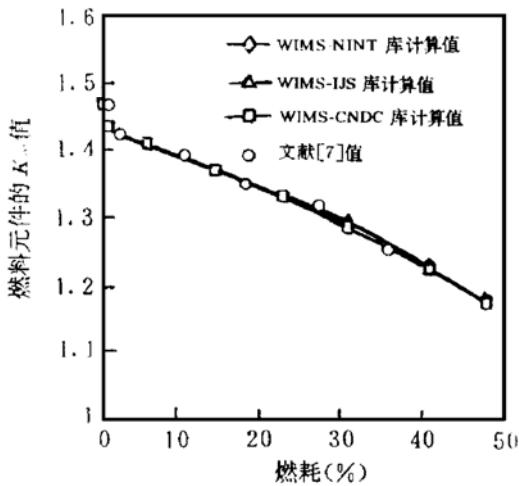


图 2 三种不同库所计算标准-12 燃料元件的  $K_{\infty}$ 值随燃耗的变化曲线

经比较可知,三种库所计算的两种类型燃料栅元不同燃耗下的  $K_{\infty}$ 非常接近,且与文献[7]中的数据一致.

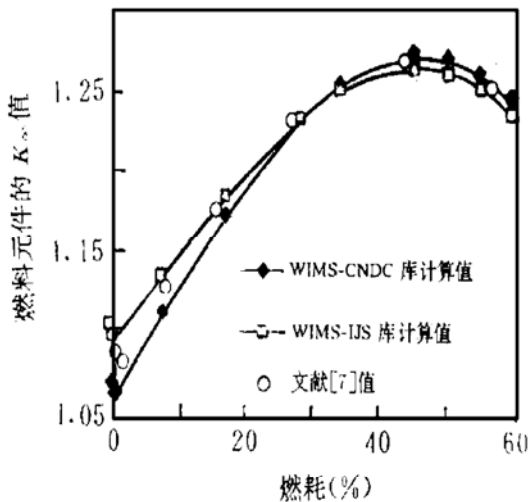


图 3 两种不同库所计算的 FLIP 燃料元件的  $K_{\infty}$ 值随燃耗的变化曲线

### 2.4 燃料栅元负温度系数的计算

燃料负温度系数主要由多谱勒展宽和谱

硬化引起,中子与氢化锆中氢原子之间存在量子化能量交换,因而温度升高时,中子将从氢原子的激发态获得很大能量,从而增大了从燃料中逃脱的几率,同时能谱变硬,产生了较大的负温度系数.含铈元件中,燃料利用温度致硬谱,通过与铈共振来降低反应性.图 4 和 5 分别给出了标准-12、LEU 两种燃料栅元的负温度系数.由图 4 可知,标准-12 燃料

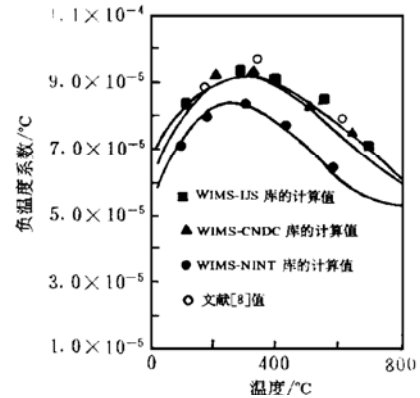


图 4 三种库所计算的标准-12 燃料元件的温度系数

元件的负温度系数在中间温度点处较大,而在低温度点和高温度点处较小,且三种库所计算的结果基本一致,且与文献[7,8]中的数据基本符合.由图 5 可以看出,FLIP 燃料元件的负温度系数随温度的增加而增加,两种库所计算的结果基本一致,且与文献[8]中的数据一致.

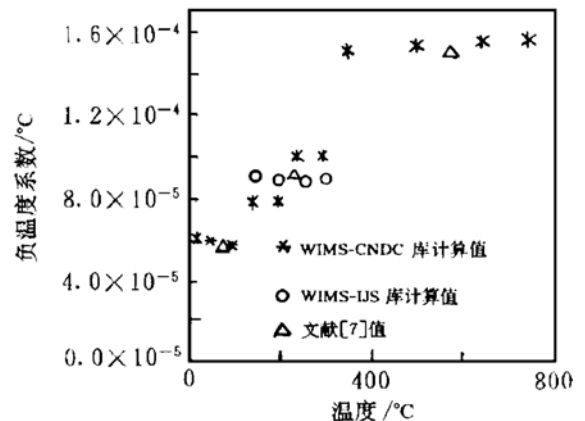


图 5 两种库所计算的 LEU 燃料元件的负温度系数

### 3 结 论

经比较可知,三种库所计算的结果基本一致,且与文献值符合得较好,它们在一定程度上均可满足脉冲堆燃料管理的计算要求,但从计算精度看,WIMS-CNDC 和 WIMS-IJS 库比较合适,而 WIMS-NINT 库还有待进一步提高计算的精度。

中国原子能院的刘萍助研和刘桂生研究员协助完成了 WIMS-CNDC 库,在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

1 项凤铎. 氢化锆和钚的散射核. 核科学与工程, 1985, 5(3): 222

2 Rell J. SUMMIT-A IBM 7090 Program for the Computation of Crystal Line Scattering Kernels. GA2492, 1962

3 章宗耀,程和平. 铀氢锆堆物理计算模型与程序. 核动力工程, 1989, 10(1): 52~57

4 Roth M J, Macdougall J D, Kemsshell PB. The Preparation of Input Data for WIMS Winfrith. 1967

5 贝尔 GI, 格拉斯登 S. 核反应堆理论. 北京: 原子能出版社, 千里译. 第七章, 1979

6 江新标, 陈达. 西安脉冲堆栅元热中子能谱计算. 西安. 西北核技术研究所硕士论文, 1996, B4879

7 Ravnik M. Nuclear Safety Parameters of Mixed TRIGA Cores. Workshop on Reactor Physics Calculations for Applications in Nuclear Technology. Trieste, 12 Feb. to 13 Mar, 1990, World Scientific Publishing, 1991, 398~421

8 Ravnik M. Principles and Physical Models of Research Reactor Calculations H4. SMR/757-2, 1994

## Evaluation of WIMS—D/4 Unclear Data Library Used on TRIGA Reactor Calculation

CHEN Wei XIE Zhongsheng

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

JIANG Xinbiao CHEN Da

(North-west Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

**Abstract** The 69 groups constants of  $^{166}\text{Er}$  and  $^{167}\text{Er}$  generated by NJOY and GASKET codes are inserted into WIMS nuclear data library WIMS-CNDC and WIMS-NINT libraries used on TRIGA reactor calculation are obtained. In order to check WIMS-CNDC and WIMS-NINT libraries, the scattering cross-section is compared with that in WIMS-IJS library. The group constant,  $K_\infty$  and temperature coefficient are calculated by using WIMS-CNDC, WIMS-NINT and WIMS-IJS. The results show the both libraries are suitable for calculation of TRIGA reactor.

**Key Words** TRIGA reactor WIMS-D/4 nuclear data library