文章编号: 1007-4627(2017) 03-0682-09

钍基熔盐堆用 238 群中子-48 群光子耦合多群常数库的屏蔽基准验证

赵秋娟, 吴海成, 吴小飞, 刘萍, 葛智刚

(中国原子能科学研究院,中国核数据中心,北京 102413)

摘要:采用OKTAVIAN脉冲球实验对钍基熔盐堆用AMPX主库格式238群中子-48群光子耦合多群常数库进行了屏蔽基准验证,重点检验了该库中的F,Li,Be,C、Al,Si,Cr,Ni,Zr,Co,Cu,Mn,Mo,Nb,Ti,W,Pb同位素/元素的数据。采用SCALE 5.1程序系统中的XSDRN-PM程序进行一维屏蔽问题计算,将计算结果与实验测量数据及MCNP程序计算结果进行比较,发现中子泄漏谱的符合程度较好,而光子泄漏谱检验中发现大多数核素都出现了不同程度的高估。通过对GENDF格式到AMPX格式的转换程序MILER-4进行修正,解决了这一问题。通过对多群常数库的屏蔽基准验证,进一步证明了该库的可靠性。 关键词:AMPX格式:多群常数库;屏蔽基准验证;中子、光子泄漏谱

中图分类号: TL426 文献标志码: A DOI: 10.11804/NuclPhysRev.34.03.682

1 引言

为满足新一代核能系统钍基熔盐堆设计用多群常数 库的需求,基于钍基熔盐堆专用评价核数据库CENDL-TMSR-V0^[1]及ENDF/B-VII.1^[2]热散射数据子库和光 原相互作用数据子库,采用中子-光子耦合群常数制作 系统NPLC-2制作了一套AMPX格式238群中子-48群 光子耦合多群常数库,记为CENDL-TMSR-AMPX。 该库包含400个核素,12种热散射材料,10个本底 截面,温度从293~2400 K共10个温度点。中子权重 谱采用"热Maxwell谱+1/E谱+裂变谱+1/E谱"的形 式,光子权重谱采用"1/E+ROLLOFFS"的形式,共 振自屏处理采用窄共振近似方法,重点锕系核素支 持Nordheim方法处理共振自屏。

为了确保群常数库的可用性和可靠性,在群常数库 的研制中,设计了一套测试与基准检验相配合,更全面 地考验群常数库的可靠性的技术路线。首先,开展了单 核素数据文档的格式和物理自洽性、合理性检查。其 次,开展了单核素数据文档的功能测试——测试单核素 数据文档的可用性。再次,开展多个核素的挑核并库测 试——测试多核素文档的可用性。最后,开展群常数库 的基准检验。图1给出了测试层级和具体组成。

对多群常数库进行全面的测试保证了它的可用性, 对该库的基准检验是为了检验该库的可靠性。对钍基熔 盐堆用 AMPX 格式中子-光子耦合多群常数库的基准检 验包括临界基准检验和屏蔽基准检验。临界基准检验的 结果见文献^[3]。



图 1 (在线彩图) AMPX 格式主库 V&V 技术路线

屏蔽基准检验的目的是为了检验主要屏蔽材料的中子、伽玛产生数据以及光子原子数据在应用中的准确性。不锈钢、混凝土是反应堆屏蔽的主要材料,包含Fe,Cr,Co,Mn,Ni,C等元素。受限于NPLC-2程序系统中的PASC4流程的几何处理能力和可获得的基准实验,针对钍基熔盐堆内可能使用的慢化剂和结构材料,采用ICSBEP^[4]中的ALARM-CF-FE-SHIELD-001裂变谱屏蔽基准实验和日本大阪大学的聚变谱屏蔽基准实验OKTAVIAN^[5,6]来检验该库中20MeV以下F,Li,Be,C,Al,Si,Fe,Cr,Ni,Zr,Co,Cu,Mn,Mo,Nb,Ti,W等元素/同位素核数据,见表1。²⁵²Cf源铁球壳屏蔽基准实验的检验结果见文献[3]。

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-05-20

作者简介:赵秋娟(1986-),女,山西寿阳人,硕士研究生,粒子物理与原子核物理专业; E-mail: qj_zhao@sohu.com。

• 683 •

| 序号 | 实验编号 | 实验描述 | 检验目的 |
|----|------------------------|---|---|
| S1 | ALARM-CF-FE-SHIELD-001 | ²⁵² Cf源铁球壳中子、光子泄漏谱 | 检验20MeV以下Fe同位素的数据。 |
| S2 | OKTAVIAN脉冲球实验 | D-T Neutrons穿过Be, Al, Si, Cr, Ni, Zr, CF ₂ , LiF, Co, Cu, Mn, Mo, Nb, Ti, W, As, Se等材料的金属球 | 检验20MeV以下F, Li, Be, C, Al, Si, Cr, Ni, Zr, Co, Cu, Mn, Mo, Nb, Ti, W同位素的数据。 |

表 1 检验 CENDL-TMSR-AMPX 库选用的屏蔽基准实验

2 OKTAVIAN 脉冲球屏蔽基准实验介 绍^[5,6]

OKTAVIAN 脉冲球实验由日本大阪大学完成。 1984-1988年间,日本大阪大学利用 OKTAVIAN 装置, 采用飞行时间法测量了 Be, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Co, Cu, Ni, Nb, Mo, W, LiF, CF₂, As, Se, Zr等多种球 壳样品的中子泄漏谱。实验的中子源为14 MeV D-T 源,TiT 靶位于样品的中心。探测器 NE218 距离氚靶 约11 m,与入射方向夹角55度。1987-1989年,大阪 大学又相继测量了 A1, Si, Ti, Cr, Mn, Co, Cu, Nb, Mo, W, Pb, LiF, CF₂等样品的γ泄漏谱。在γ泄漏 谱的测量中,除Pb 以外,样品与中子测量中所用到的 相同,γ探测器为 NaI 晶体。实验同时测量了中子和γ 射线的脉冲幅度谱,所得中子谱与测量中子泄漏谱时 的结果相同。实验装置如图2所示。脉冲球的类型共 有4种,分别是: 61 cm(Type-I),40 cm(Type-II),60 cm(Type-III), 28 cm(Type-IV)。图3中从左到右分别 给出了Type-I、Type-II、Type-III类型脉冲球几何示 意图。Type-IV类型脉冲球由0.3 cm厚的不锈钢(JIS SUS-304)构成,凹洞与Type-I类型脉冲球类似,且 仅Nb脉冲球为Type-IV类型。



图 2 OKTAVIAN 脉冲球基准实验几何示意图



图 3 Type-I、Type-II、Type-III类型脉冲球几何示意图

OKTAVIAN系列实验具有以下几个特点^[7]:

(1) 实验的几何结构简单,易于进行计算;

(2)每次实验的样品纯度高,元素种类单一或很少, 易于进行检验分析;

(3) 样品覆盖面广,包括结构材料 (Al, Cu, Nb, Mo, W等)、反射层材料 (Be)、中子增殖材料 (Be, Pb)、造
 氚材料 (⁶Li, ⁷Li)、屏蔽材料 (不锈钢);

(4) 实验中测量的球壳样品的中子泄漏谱可以用于 检验核素的弹性散射、非弹散射以及(n, 2n), (n, np), (n, nα)等中子发射反应的截面和次级中子出射谱;

(5) 另外, OKTAVIAN实验测量的γ泄漏谱主要

由 (n, n'), (n, 2n), (n, p), (n, α), (n, np), (n, n α) 等反 应的瞬发 γ 构成,可以用于检验去弹反应的评价。

从实验的特点不难看出应用该套实验的一个作用就 是检验聚变谱下各种核数据的可靠性,另一个重要的作 用是在相对单一的情况下对各种材料进行检验,这在临 界基准实验中通常是不具备的。因此,对多群常数库进 行屏蔽基准验证对于核工程应用具有重要的意义。

3 计算方法

铁球实验和OKTAVIAN脉冲球实验均可用 XSDRN-PM程序^[8]进行一维球模型计算。过去的研

究表明,从MCNP^[9]三维模型向XSDRN-PM一维模 型的简化不会显著地改变计算的中子和光子泄漏谱。铁 球实验和 OKTAVIAN 脉冲球实验的中子和光子泄漏谱 计算属于外源问题,采用SCALE/XSDRN-PM^[8]进行 计算,计算流程见图4。首先,用AJAX程序将屏蔽基 准实验所涉及到的所有核素从AMPX 主库中挑选出来, 采用邦达连柯方法 (BONAMI-II 程序^[8]) 在整个共振区 进行共振自屏计算,再用 NITAWL-II 程序^[8]将 AMPX 主库转换为屏蔽计算用工作库,最后用 XSDRN-PM 程序进行一维屏蔽问题计算。与临界问题不同的是, 这两个屏蔽基准实验的模拟需要定义中子和光子源 项。需要将 ICSBEP 手册中给出的中子和光子源项转 换到 CENDL-TMSR-AMPX 库的能群结构上。具体到 计算中,是XSDRN-PM程序需要用户提供每个能群上 归一的体积源谱,对于CENDL-TMSR-AMPX 库的屏 蔽计算,需要的源谱为238群中子源谱或48群光子源 谱。因为实验测量的中子或光子源谱的能区边界与多 群库的能群边界不一致,因此设计了以ICSBEP的能 谱作为 MCNP^[9] 源项, 238 群和 48 群分别作为中子和 光子注量F1计数器的能群结构的中子-光子耦合输运 问题,计算238群上的源中子谱和48群上的源光子谱。 MCNP 统计得到的中子注量是归一的,需要除以 xsdrn 中使用的体积源体积进行体积归一,得到每群上的归一 中子注量,即得到 XSDRN-PM 程序需要输入的体积源 谱。



图 4 屏蔽计算流程图

4 计算结果

图 5 给 出 了 OKTAVIAN 脉 冲 球 实 验 中 Be, Al, CF₂, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, W, Zr 球的中子泄漏谱的计算结果与实验值以及 CENDL-

TMSR-ACE 库的计算结果的比对。图中: EXP代 表实验值; TMSR-238代表 CENDL-TMSR-AMPX 库 的计算结果; TMSR-ACE代表中国核数据中心基 于 CENDL-TMSR 微观评价核数据库研制的 ACE 格式 库 CENDL-TMSR-ACE,用 MCNP5 程序^[9]计算得到 的结果。可以看出,对于中子泄漏谱,CENDL-TMSR-AMPX 库的计算结果与连续能量点截面库 CENDL-TMSR-ACE 的结果一致性较好,且与实验值符合得 也较好。说明 CENDL-TMSR-AMPX 库的计算结果能 够很好地预测 Be, Al, CF₂, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, W, Zr 球的中子泄漏谱。

最初的光子泄漏谱的检验结果发现Cr和Si的结果较好,其它几个装置的计算结果与MCNP计算结果和实验数据相比,都出现了不同程度的高估,其中W和Mn高估得较多,甚至出现数量级的高估。图6给出了修订前W球和Mn球的光子泄漏谱。从图中可以看出同样是基于CENDL-TMSR-V0库研制的连续能量点截面库CENDL-TMSR-ACE的计算结果没有出现高估的问题,因此排除了评价数据中的中子产生光子及光子。原子相互作用数据的问题。

导致光子泄漏谱高估的唯一可能原因就是 GENDF 格式^[10]到AMPX 主库格式的转换程序 MILER-4^[11] 对 光子数据的处理存在问题,该程序的说明也指出并 没有对AMPX 格式数据中的光子数据进行过验证。 MILER-4程序对中子产生的光子多群数据的处理只 是将某一群散射到各个到达群的概率转换为各个出 发群散射到某一群的概率。进一步地研究发现应该 在此基础上除以特定反应道出发群对应的群截面, 即AMPX主库给出的是散射概率与光子产生多重性 的乘积。经过修正后得到的光子泄漏谱的比对结果 见图7。图7依次给出了OKTAVIAN脉冲球实验中Al, CF₂, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Pb, Si(40 cm), Si(60 cm), Ti, W球的光子泄漏谱的计算结果与实验值 以及CENDL-TMSR-ACE 库的计算结果的比对。可以 看出, CENDL-TMSR-AMPX 库的计算结果与连续能 量点截面库CENDL-TMSR-ACE的结果一致性较好, 且与实验值符合得也较好。其中,多群库的结果中Cu 球的计算结果与MCNP的计算结果符合得略差;除 了 Al 和 Ti 球壳的 MCNP 的计算结果与实验值相比略 低外,其它几个装置的 MCNP 计算结果与实验值符合 得都较好。检验结果说明 CENDL-TMSR-AMPX 库的 计算结果能够很好地预测Al, CF₂, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Pb, Si, Ti, W球的光子泄漏谱。





图 5 (在线彩图) OKTAVIAN 脉冲球实验中 Be, Al, CF₂, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, W, Zr 球的中子泄漏谱的计算结果与实验值以及 CENDL-TMSR-ACE 库的计算结果的比对



图 6 (在线彩图)修订前W球和Mn球的光子泄漏谱





图 7 (在线彩图) OKTAVIAN 脉冲球实验中 Al, CF2, Co, Cr, Cu, LiF, Mn, Mo, Nb, Pb, Si(40 cm), Si(60 cm), Ti, W 球的光子泄漏谱的计算结果与实验值以及 CENDL-TMSR-ACE 库的计算结果的比对

5 总结

屏蔽基准检验可以检验主要屏蔽材料的中子、伽玛 产生数据以及光子原子数据在应用中的准确性,是临界 基准检验的必要补充。本文介绍了采用OKTAVIAN脉 冲球实验对钍基熔盐堆用AMPX主库格式238群中子-48群光子耦合多群常数库进行了屏蔽基准验证的计算方 法和中子、光子泄漏谱的检验结果。检验结果表明中子 泄漏谱的符合程度较好,但大多数核素的光子泄漏谱都 出现了不同程度的高估。通过对GENDF格式到AMPX 格式的转换程序 MILER-4中光子多群数据处理部分进 行修正,使得光子泄漏谱的计算结果与MCNP 计算结 果和实验值都符合得较好。通过采用OKTAVIAN脉冲 球对多群常数库的屏蔽基准验证,进一步证明了该库的 可靠性。

参考文献:

 WU Haicheng. Evaluated Nuclear Data Library (CENDL-TMSR) Recommended for the Nuclear Design of Thorium Molten Salt Reactor[R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2012. (in Chinese)
 (吴海成. 钍基熔岩堆设计用中子评价数据库(CENDL-

TMSR)推荐[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2012.)

- [2] KAHLER A C, MACFARLANE R E, MOSTELLER R D, et al. Nuclear Data Sheet, 2011, 112: 2997.
- [3] ZHAO Qiujuan, WU Haicheng, LIU Ping, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 1.(in Chinese)

(赵秋娟, 吴海成, 刘萍, 等. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 1.)

- [4] BRIGGS J B. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments[R]. Paris: Nuclear Energy Agency, France, 2006.
- [5] CHIHIRO I, KATSUHEI K, SHU A, et al. Leakage Neutron Spectra from Various Sphere Piles with 14 MeV Neutrons. JAERI-M 94-014, Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- [6] YAMAMOTO J, KANAOKA T, MURATA I. Gamma-ray Energy Spectra Emitted from Spheres with 14 MeV Neutron Source, JAERI-M 94-014, Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- [7] WU Haicheng. Systematic Benchmarking Applied for ENDF/B-VII.0[R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2007. (in Chinese)
 (吴海成. ENDF/B-VII.0中采用的系统化宏观检验[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2007.)
- [8] SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, Version 6, Vols. I-III, ORNL/TM-2005/39[R]. US: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- X- Monte-Carlo Team. MCNP: A general Monte Carlo Nparticle transport code, Version 5[R]. US: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [10] MACFARLANE R E, MUIR D W. NJOY99.0: Code System for Producing Point Wise and Multigroup Neutron and Photon Cross Sections from ENDF/B data[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [11] DE LEEGE P F A. NSLINK NJOY-SCALE-LINK User's Manual. IRI-131-091-003, Delft University, Netherlands, 1991.

Shielding Benchmarks of the 238-NEUTRON AND 48-Gamma Ray Coupled Group Constant Library for Thorium Molten Salt Reactor

ZHAO Qiujuan¹⁾, WU Haicheng, WU Xiaofei, LIU Ping, GE Zhigang

(China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: OKTAVIAN pulsed sphere experiment was used for Shielding Benchmarks of the AMPX formatted multi-group (238n-48 γ) coupled neutron-gamma cross-section library for Thorium Molten Salt Reactor, of which the following isotopes/elements were checked—F, Li, Be, C, Al, Si, Cr, Ni, Zr, Co, Cu, Mn, Mo, Nb, Ti, W. One dimension shielding problem was calculated using XSDRN-PM program of SCALE 5.1 code system and results were compared with experiment results and MCNP calculated results, which shows that neutron leakage spectra agree well. Calculated results of photon leakage spectra of most facilities compared with MCNP results and experiment data are over-rated. MILER-4 code which is used for converting GENDF files produced by NJOY to the AMPX master library format is revised to solve this problem. The shielding benchmark verifications confirm the reliability of this new library.

Key words: AMPX format; multi-group constant library; shielding benchmarks; neutron and photon leakage spectrum

1) E-mail: qj_zhao@sohu.com.