

加速器驱动次临界系统高能核数据库的制作及应用

李勋昭, 吴宏春, 郑友琦, 周生诚, 何明涛

(西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 加速器驱动次临界系统(ADS)是带高能外源驱动的系统,其质子能量高达 GeV,同时散裂反应产生的散裂中子能量分布跨度大。由于目前高能核数据库的缺乏,在 ADS 核设计方面堆芯部分是基于 20 MeV 以下中子核数据库进行分析研究的。本文主要基于日本的 JENDL-HE-2007 高能中子评价数据库,使用 NJOY 程序加工部分关键核素的 ACE 格式数据库 NECL-HE/MC,并使用 MCNPX 程序在数据库方面采用的高能散裂物理模型和 NECL-HE/MC 核数据库进行计算验证。验证结果表明,本文制作的 NECL-HE/MC 核数据库在 ADS 核设计中基本可靠。另一方面,应用 NECL-HE/MC 分析研究了不同能量段的散裂中子源对 ADS 的外中子源效率的影响,数值结果显示 2.5% 的高于 20 MeV 的散裂中子源对 ADS 的总外中子源效率的贡献接近 20%。

关键词: 高能核数据库; 加速器驱动次临界系统; 中子源效率

中图分类号: TL329

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)S0-0371-06

doi: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0371

Development and Application of High-energy Nuclear Data Library for Accelerator Driven Sub-critical System

LI Xun-zhao, WU Hong-chun, ZHENG You-qi, ZHOU Sheng-cheng, HE Ming-tao
(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With high-energy external source, the proton energy of accelerator driven sub-critical system (ADS) is up to GeV, and the energy of spallation neutron which is produced by the spallation reactions has great energy spans. Due to the lack of high-energy nuclear library, the nuclear analysis of ADS design was based on the below 20 MeV neutron nuclear library. This paper was mainly based on the Japanese JENDL-HE-2007 high-energy neutrons evaluation library, using the NJOY to produce the ACE format data library of some key nuclides named NECL-HE/MC. Meanwhile, to validate NECL-HE/MC nuclear library, the high-energy physics model of MCNPX and NECL-HE/MC nuclear data library were compared. The results show that the NECL-HE/MC nuclear data library is reliable for ADS design. On the other hand, the effects of the

different energy spallation neutron sources on the ADS external neutron source efficiency were analyzed with the application of the NECL-HE/MC. The results show that the above 20 MeV energy spallation neutron source which is 2.5% of the total number of spallation neutron source, contributes to about the 20% of the total external neutron source efficiency.

Key words: high-energy nuclear data library; accelerator driven sub-critical system; neutron source efficiency

近年来,加速器驱动次临界系统(ADS)作为可使核能大规模、可持续发展的创新技术路线在国际上形成了一个研究热点,研究表明ADS是理想的长寿命放射性废物焚烧炉^[1],是嬗变次锕系核素(MA)的有效技术途径之一。ADS主要是由质子加速器、散裂靶及次临界堆芯组成,质子加速器产生的高能质子轰击重核散裂靶产生高能的散裂中子,从而驱动次临界堆芯发生核反应,以达到嬗变核废料和增殖核燃料的目的。

目前,对于ADS反应堆核设计采用的核数据库主要是基于现有的反应堆核设计的核数据库或改进后的核数据库。大多核数据库的能量上限为20 MeV,而ADS中,散裂中子源的中子能量分布范围广、跨度大,可从 10^{-5} eV到GeV。现有的专用核数据库忽略20 MeV以上的中子数据对ADS的影响,这必将给ADS的核设计带来一定的偏差。

为分析高能核数据对ADS性能参数的影响,本文基于JENDL-HE-2007高能中子评价库^[2],使用NJOY程序^[3]加工适用于蒙特卡罗程序计算的ACE格式的ADS专用核数据库NECL-HE/MC,并采用一系列的基准题实验例题对该核数据库进行校核以检验数据库的合理性。最后基于NECL-HE/MC核数据库,分析不同能量段的散裂中子源对ADS外中子源效率的影响。

1 NECL-HE/MC核数据库的设计与制作

1.1 NECL-HE/MC核数据库的NJOY建模

NECL-HE/MC核数据库主要是针对ADS的蒙特卡罗程序模拟计算使用。该核数据库的格式为ACE格式,制作流程如图1所示。评价库来源日本的JENDL-HE-2007。JENDL-HE-2007包含能量高达3 GeV的106种核素的中子核反应数据。由于NJOY程序版本的问题,其

中²³⁵U和¹⁴N两种核素无法成功加工制作。本文共加工104种核素的高能核数据库。

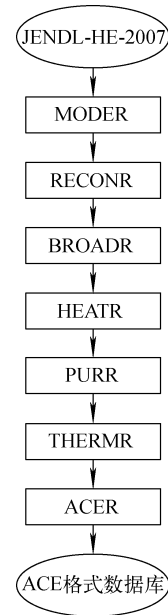


图1 NECL-HE/MC核数据库制作流程
Fig.1 Processing sequence of NECL-HE/MC nuclear data library

1.2 NECL-HE/MC核数据库制作参数选择

本文加工的核素的温度均取300 K。制作过程中主要参数选择列于表1。

表1 NECL-HE/MC核数据库制作参数
Table 1 Parameter of NECL-HE/MC nuclear data library

参数	描述	取值
err	重构最大误差	0.1%
errint	共振峰最大积分误差	5.0×10^{-8}
temp	截面温度	300 K
nbin	出射中子的角度离散数	20
emax	热区边界值	4.0 eV
iinc	非弹性散射分布计算模型	自由气体模型
nbint	散射出的中子的能量离散数	64

2 NECL-HE/MC 核数据库的数值验证

2.1 散裂靶模型的计算

使用 MCNPX^[4] 模拟计算质子束和²⁰⁸Pb 靶的相互作用。计算模型参考 MCNPX 说明书中附录 E 的例题 1, 靶直径为 10 cm, 长为 30 cm, 质子束直径为 7 cm。分别采用 LA150N 数据库、IAEA-ADS 截面库^[5] 网站上 1 GeV 的²⁰⁸Pb 数据库以及 NECL-HE/MC 数据库进行 MCNPX 模拟计算, 质子束的能量分别取 1、1.5、2、2.5、3 GeV。散裂中子产额如图 2 所示。3 种核数据库吻合良好。1 GeV 质子束轰击²⁰⁸Pb 靶产生的散裂中子能谱如图 3 所示。散裂中子能谱分布趋势一致。在低能段, 由于评价库来源不同, 散裂中子能谱偏差较大, 在 高能段, 散裂中子能谱曲线几乎重合。

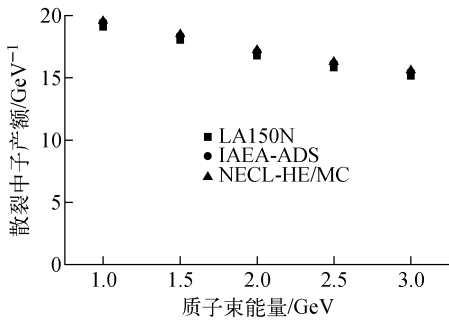


图 2 采用不同核数据库计算的不同能量质子束轰击²⁰⁸Pb 靶的散裂中子产额

Fig. 2 Spallation neutron yield of ²⁰⁸Pb target with different energy incident protons and nuclear data libraries

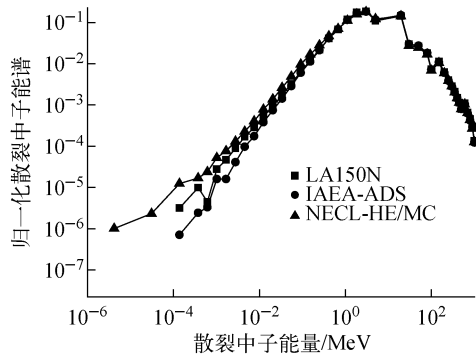


图 3 1 GeV 质子束轰击²⁰⁸Pb 靶产生的散裂中子能谱

Fig. 3 Spallation neutron spectrum of ²⁰⁸Pb target with energy of 1 GeV incident proton

2.2 临界基准实验装置的验证

利用国际临界安全基准评价实验 (ISBEP2006^[6]) 中的高富集²³⁵U 装置、中富集²³⁵U 装置、低富集²³⁵U 装置、Pu 装置、U-Pu 装置和²³³U 装置 6 类临界装置对 NECL-HE/MC 数据库进行了数值验证。基于 NECL-HE/MC 数据库和西安交通大学 NECP 实验室自主开发的基于 ENDF/B-VII.0^[7] 的 NECL-1.0/MC^[8] 数据库, 使用 MCNP5^[9] 统计 k_{eff} , 以及在 $10 \times 10^{-5} \sim 0.625$ eV、 0.625 eV ~ 100 keV 和 100 keV 以上 3 个能量区间的中子注量率, 并将统计结果与临界安全基准实验装置实验值进行比较。各实验装置的描述列于表 2。具体的几何及材料描述见国际临界安全基准评价实验手册 ISBEP2006。 k_{eff} 计算结果如图 4 所示。NECL-HE/MC 和 NECL-1.0/MC 的结果基本一致, NECL-HE/MC 大多的计算结果与实验值吻合良好。

临界基准题在 $10 \times 10^{-5} \sim 0.625$ eV、 0.625 eV ~ 100 keV 和 100 keV 以上 3 个能量区间的中子注量率列于表 3, NECL-HE/MC 和 NECL-1.0/MC 的结果基本一致, NECL-HE/MC 的计算结果更倾向于实验值。NECL-HE/MC 与实验的 k_{eff} 的结果基本吻合。

3 NECL-HE/MC 核数据库的应用

3.1 外中子源效率的定义和计算模型的建立

外中子源效率是评价 ADS 的重要参数之一。本文基于 NECL-HE/MC 核数据库, 建立简化的 ADS 计算模型, 模拟散裂中子源对 ADS 外中子源效率的影响。外中子源效率 φ^* 为:

$$\varphi^* = \left(\frac{1}{k_{eff}} - 1 \right) / \left(\frac{1}{k_s} - 1 \right) \quad (1)$$

将散裂中子源的能量分为 4 段, 分别为 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 20$ 、 $20 \sim 150$ 、 $150 \sim 1500$ MeV。对于每个能量段 S_i 内的外中子源效率 φ_i^* 可表达为:

$$\varphi_i^* = \left(\frac{1}{k_{eff}} - 1 \right) / \left(\frac{1}{k_{s(i)}} - 1 \right) \quad (2)$$

通过简单的推导, 可得到总外中子源效率与各能量段外中子源效率的关系, 表达式如下:

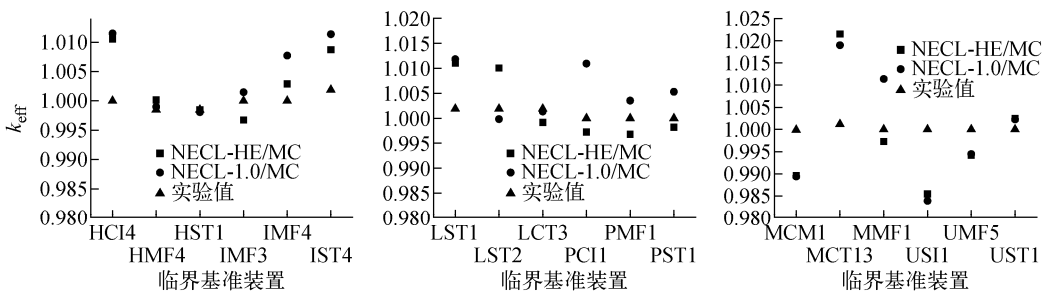
$$\varphi_t^* = \sum_{i=1}^4 \varphi_i^* \frac{\langle S_i \rangle}{\langle S_t \rangle} \quad (3)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示积分算符。

表 2 临界安全基准实验装置描述

Table 2 Description of criticality safety benchmark experiment assembly

ISBEP 编号	缩写	能谱	实验装置描述
HEU-COMP-INTER-004	HCI4	中能谱	^{235}U 含量达 92.28% 的均匀实验装置
HEU-MET-FAST-001-001	HMF4	快谱	^{235}U 含量达 93.71% 的金属球实验装置
HST-SOL-THERM-001-001	HST1	热谱	^{235}U 含量达 93.17% 的溶液装置
IEU-MET-FAST-003	IMF3	快谱	^{235}U 富集度为 36% 的金属裸球装置
IEU-MET-FAST-004	IMF4	快谱	^{235}U 富集度为 36% 的石墨反射层金属球装置
IEU-SOL-THERM-004	IST4	热谱	^{235}U 富集度为 14.7% 的 BeO 反射层溶液装置
LEU-SOL-THERM-001	LST1	热谱	含有 UO_2F_2 和 H_2O 的溶液装置, Sheba-II 组件
LEU-SOL-THERM-002-001	LST2	热谱	4.9% 富集度的 UO_2F_2 溶液装置, 球形容器
LEU-COMP-THERM-003	LCT3	热谱	2.35% 富集度的轻水慢化组件问题
PU-COMP-INTER-001	PCI1	中能谱	含 ^{239}Pu 的均匀问题
PU-MET-FAST-001	PMF1	快谱	^{239}Pu 富集度为 4.5% 的金属裸球装置
PU-SOL-THERM-001	PST1	热谱	水反射层的硝酸铀溶液装置, 球形容器
MIX-COMP-THERM-001	MCM1	热谱	石墨慢化的 MOX 燃料均匀平板装置
MIX-COMP-THERM-013	MCT13	热谱	聚苯乙烯慢化的 MOX 燃料组件装置
MIX-MER-FAST-001	MMF1	快谱	外层是金属铀、内层是金属铀的金属球装置
U233-SOL-INTER-001	USI1	中能谱	含有 ^{233}U 、反射层为 BeO 的溶液装置
U233-MET-FAST-005	UMF5	快谱	^{233}U 含量达 98.2%、反射层为 BeO 的金属球装置
U233-SOL-THERM-001	UST1	热谱	^{233}U 含量达 97.7% 的硝酸铀溶液装置

图 4 临界安全基准题 k_{eff} 比较Fig. 4 Comparison of criticality safety benchmark k_{eff}

质子束能量为 1.5 GeV, 燃料为弥散体燃料 (TRU-10Zr)-Zr^{*}。超铀核素 (TRU) 中包含 Pu 向量和 ^{241}Am 。分别设置 k_{eff} 为 0.94、0.96 及 0.98。

3.2 计算结果及分析

不同次临界度下各能量段散裂中子源对外中子源效率的影响列于表 4。计算结果表明, 2.5% 的高能散裂中子源 (高于 20 MeV) 对外中子源效率的贡献在 20% 左右, 同时在一定的次临界范围内, 这种贡献值基本保持稳定。散裂中

子源的能谱分布对外中子源效率的影响至关重要, 由于本文所设计的模型中, 散裂中子源主要分布在 0~5 MeV 的能量区间内, 但很明显的是低能段由于散裂中子源能谱相对高能区较软, 故相应的外中子源效率比较小, 随着散裂中子源能量的增加, 外中子源效率急剧增加, 甚至高达 20 左右, 远大于 20 MeV 以下中子能量段所引起的外中子源效率。散裂中子源的能谱对外中子源效率的影响很大, 同时, 如果忽略高能散裂中子源, 将会给 ADS 设计带来较大的偏差。

表 3 临界安全基准题中子注量率比较

Table 3 Comparison of criticality safety benchmark neutron fluence rate

编号	能量区间	中子注量率/%		
		NECL-HE/MC	NECL-1.0/MC	实验值
HCI4	<0.625 eV	0.26	0.26	0.2
	0.625 eV~100 keV	62.51	62.48	62.7
	>100 keV	37.24	37.26	37.1
HMF4	<0.625 eV	0.08	0.08	0.1
	0.625 eV~100 keV	6.92	6.93	7.2
	>100 keV	93.00	92.99	92.7
HST1	<0.625 eV	16.83	16.69	16.8
	0.625 eV~100 keV	34.10	34.08	34.1
	>100 keV	49.07	49.23	49.1
IMF3	<0.625 eV	0.00	0.00	0.0
	0.625 eV~100 keV	7.51	7.37	7.2
	>100 keV	92.49	92.63	92.8
IMF4	<0.625 eV	0.00	0.00	0.0
	0.625 eV~100 keV	8.25	8.07	8.2
	>100 keV	91.75	91.93	91.8
IST4	<0.625 eV	37.81	37.76	37.7
	0.625 eV~100 keV	28.25	28.19	28.4
	>100 keV	33.94	34.04	33.9
LST1	<0.625 eV	28.66	28.58	28.6
	0.625 eV~100 keV	31.29	31.19	31.2
	>100 keV	40.05	40.23	40.2
LCT3	<0.625 eV	31.64	31.55	31.3
	0.625 eV~100 keV	31.45	31.27	31.5
	>100 keV	36.91	37.19	37.2
PMF1	<0.625 eV	0.00	0.00	0.0
	0.625 eV~100 keV	2.51	2.47	2.6
	>100 keV	97.49	97.53	97.4
MCM1	<0.625 eV	0.22	0.22	0.2
	0.625 eV~100 keV	36.86	36.86	36.8
	>100 keV	62.92	62.92	63.1
MCT13	<0.625 eV	11.91	11.9	11.8
	0.625 eV~100 keV	36.84	36.83	37.1
	>100 keV	51.25	51.27	51.0
MMF1	<0.625 eV	0.00	0.00	0.0
	0.625 eV~100 keV	2.86	2.79	2.9
	>100 keV	97.14	97.21	97.1

表4 不同次临界度下各能量段散裂中子源对外中子源效率的影响

Table 4 Effect of spallation neutron source for different energy segments on external neutron source efficiency under different sub-criticalities

k_{eff}	源分区	能量范围/MeV	$\frac{\langle S_i \rangle}{\langle S_t \rangle}$	$k_{s(i)}$	φ_i^*	$\varphi_i^* \frac{\langle S_i \rangle}{\langle S_t \rangle}$
0.939 63	S ₁	0~5	0.935 981	0.922 23	0.76	0.713 128(74%)
	S ₂	5~20	0.037 954	0.960 30	1.55	0.058 988(6%)
	S ₃	20~150	0.021 511	0.987 58	5.11	0.109 939(11%)
	S ₄	150~1 500	0.004 554	0.996 51	18.34	0.083 51(9%)
	S _t	0~1 500	1	0.937 74	0.97	
0.959 21	S ₁	0~5	0.935 981	0.947 50	0.77	0.718 317(74.3%)
	S ₂	5~20	0.037 954	0.972 88	1.53	0.057 89(6%)
	S ₃	20~150	0.021 511	0.991 63	5.04	0.108 379(11.2%)
	S ₄	150~1 500	0.004 554	0.997 65	18.03	0.082 122(8.5%)
	S _t	0~15 00	1	0.958 34	0.98	
0.979 55	S ₁	0~5	0.935 981	0.973 56	0.77	0.719 419(75%)
	S ₂	5~20	0.037 954	0.986 08	1.48	0.056 135(6%)
	S ₃	20~150	0.021 511	0.995 65	4.78	0.102 839(11%)
	S ₄	150~1 500	0.004 554	0.998 77	16.97	0.077 272(8%)
	S _t	0~1 500	1	0.978 26	0.94	

注:括号内为散裂中子源对外中子源效率的贡献

4 讨论及结论

本工作针对 ADS 具有中子能量范围广、跨度大的特点,基于 JENDL-HE-2007 中子评价库,使用 NJOY 程序成功地加工 NECL-HE/MC 核数据库。经过简单的高能散裂靶和国际临界安全基准题实验装置的验证,验证了该核数据库的可靠性与合理性。针对散裂中子源对 ADS 外中子源效率的影响,设计了一简化的 ADS 模型,分析了不同次临界度下,0~5、5~20、20~150、150~1 500 MeV 4 个能量段的散裂中子源对外中子源效率的影响,研究表明,2.5%的高能散裂中子源(高于 20 MeV)对总外中子源效率的贡献在 20%左右,同时在一定的次临界范围内,这种贡献值基本保持稳定。高能散裂中子源不容忽略。

由于高能数据基准题(尤其是达到 GeV 以上数据)的缺乏,NECL-HE/MC 核数据库的验证还存在不足,有待进一步的验证。高能散裂中子源对 ADS 的外中子源影响较大。对 ADS 设计的其他参数(如结构材料的原子离位损伤)的影响有待进一步分析研究。

参考文献:

[1] 赵志祥,夏海鸥. 加速器驱动次临界系统(ADS)与核能可持续发展[J]. 中国核电,2009,2(3):

202-211.

ZHAO Zhixiang, XIA Haihong. Study on ADS and the sustainable development of nuclear energy[J]. China Nuclear Power, 2009, 2(3): 202-211(in Chinese).

- [2] JENDL-HE-2007[DB/OL]. 2014-10-25. <http://www.nds.iaea.org/public/download-endf/JENDL-HE-2007/>.
- [3] MacFARLANE R, MUIR D. The NJOY nuclear data processing system, version 91, LA-12740-M[R]. USA: LANL, 1994.
- [4] PELOWITZ D B. MCNPXTM user's manual, version 2. 5. 0, LA-CP-05-0369 [R]. USA: LANL, 2005.
- [5] ADS-HE nuclear data library[DB/OL]. 2014-10-25. <http://www.nds.iaea.org/ads/adshe.html>.
- [6] YOLANDA R, ALI N, ENRICO S, et al. International criticality safety benchmark evaluation working group participants[R]. France: Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, 2006.
- [7] ENDF/B-VII.0[DB/OL]. 2014-10-25. <http://www.nds.iaea.org/public/download-endf/ENDF-B-VII.0/>.
- [8] 刘志彦. 中子学计算中的连续能量核数据库和多群核数据库的开发[D]. 西安:西安交通大学,2011.
- [9] X-5 Monte Carlo Team. MCNP: A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 5, LA-UR-03-1987[R]. USA: LANL, 2003.