

铍反射层临界基准实验分析

胡泽华 尹延朋 叶涛

Analysis of criticality benchmark experiments with beryllium reflectors

Hu Ze-Hua Yin Yan-Peng Ye Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 212801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.212801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.212801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

球床高温气冷堆燃料颗粒中放射性核素的累积释放份额研究

Study on cumulative fractional release of radionuclides in HTGR fuel particles

物理学报.2014, 63(3): 032802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.032802>

非定常输运问题适应于消息传递并行编程环境的香农熵计算方法

Efficient method of calculating Shannon entropy of non-static transport problem in message passing parallel programming environment

物理学报.2016, 65(14): 142801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.142801>

基于节块展开法的 Jacobian-Free Newton Krylov 联立求解物理-热工耦合问题

Jacobian-Free Newton-Krylov based on nodal expansion method for neutronic-thermal hydraulic coupling problem

物理学报.2016, 65(9): 092801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.092801>

蒙特卡罗临界计算全局计数效率新算法研究

Algorithm researches for efficient global tallying in criticality calculation of Monte Carlo method

物理学报.2016, 65(6): 062801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.062801>

反应堆蒙特卡罗临界模拟中均匀裂变源算法的改进

Modified uniform-fission-site algorithm in Monte Carlo simulation of reactor criticality problem

物理学报.2015, 64(5): 052801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.052801>

铍反射层临界基准实验分析*

胡泽华¹⁾²⁾ 尹延朋^{3)†} 叶涛¹⁾

1) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

2) (中国工程物理研究院高性能数值模拟软件中心, 北京 100088)

3) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2016年1月19日收到; 2016年8月8日收到修改稿)

作为重要的核材料, 铍的中子核反应数据的可靠性对核工程有重要的意义. 临界积分实验是检验核数据可靠性乃至指明核数据改进方向的基本手段. 两个系列的铍金属反射层临界积分实验HMF058和HMF066, 在铍的中子核数据检验中给出了明显矛盾的结论, 使得这些积分实验无法评价核数据的品质, 更不能指出明确的数据改进方向. 本文提出利用相似性理论分析临界积分实验自洽性的方法, 主要采用基于灵敏度系数的相似性指标, 对两系列实验进行相似度分析. 分析结果显示, 对于两系列中高度相似的实验, 积分量模拟结果与实验值的偏差存在显著的差异. 数值模拟与理论分析都表明, 无法通过改进核数据来同时改进HMF058和HMF066的模拟计算与实验的符合. 据此, 推论HMF058和(或)HMF066基准临界积分实验的测量或评价可能存在系统性的疏失, 有必要对实验进行细致的再评价, 或开展可靠的新积分实验以排除不可靠的实验, 避免误导核数据的检验.

关键词: 临界基准实验, 中子有效增殖因数, 相似性分析, 中子核数据

PACS: 28.20.-v, 28.20.Gd, 28.41.-i, 28.41.Ak

DOI: 10.7498/aps.65.212801

1 引言

铍(Be)在自然界中只存在⁹Be同位素, 是最轻的碱金属, 具有优良的物理、化学及核反应性能, 在反应堆及中子源中都有重要的应用. 在反应堆工程中, 铍可作为中子慢化剂和反射层, 同时还能实现中子增殖(通过(n, 2n)反应), 是重要的核材料. 因此, ⁹Be的中子核反应数据一直备受关注. 几十年来, 开展了大量⁹Be的中子核反应数据的测量和理论研究工作, 同时也进行了大量的积分实验测量. 为满足应用的需求, 主要的评价核数据库(如ENDF/B等^[1], JENDL^[2], JEFF^[3], CENDL^[4], ROSFOND^[5]), 都给出了全套的⁹Be中子核反应数据.

中子与⁹Be可发生多种核反应, 除在全能域可发生弹性散射和辐射俘获反应外, 随中子入射能量的升高, 还可发生多种粒子发射反应, 各种核反应的阈能见表1. 对⁹Be的(n, np)、(n, nd)、(n, nt)反应道, 由于缺乏实验数据, 且阈能很高(> 18.5 MeV), 一般评价核数据库直接忽略; 而非弹性散射和(n, n α)反应都作为(n, 2n)反应的中间过程. 这样, 一般⁹Be的中子评价数据包含的反应道有: 弹性散射、(n, 2n)、辐射俘获、(n, p)、(n, d)、(n, t)和(n, α). 如图1所示, ⁹Be的总截面主要由弹性散射截面贡献; (n, α)和(n, 2n)截面在较高的能区也有一定的贡献; (n, p)、(n, d)和(n, t)截面只在11 MeV以上能域有较小的贡献; 而辐射俘获截面在全能域都极小.

* 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金(批准号: 2013AA02)、能源局06重大专项(批准号: 2015ZX06002008)和国家磁约束核聚变能研究专项(批准号: 2015GB108002)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 149913022@qq.com

表1 ^9Be 各反应道的阈能 (数据取自 ENDF/B-VII.1 库 [6])
 Table 1. Threshold energies for reactions of ^9Be (taken from ENDF/B-VII.1 library [6]).

反应道	反应道							
	(n, α)	(n, n α), (n, 2n)	(n, t)	(n, p)	(n, d)	(n, nd)	(n, np)	(n, nt)
阈能/MeV	0.67	2.74	11.6	14.26	16.29	18.55	18.76	19.65

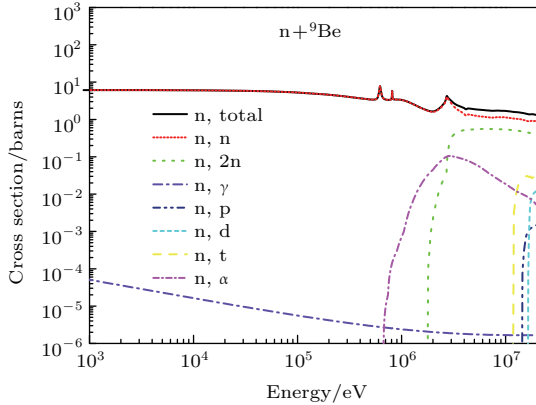


图1 (网刊彩色) ^9Be 的中子核反应截面 (数据取自 ENDF/B-VII.1 库 [6])
 Fig. 1. (color online) Neutron nuclear reaction cross sections for ^9Be (taken from ENDF/B-VII.1 library [6]).

尽管 ^9Be 核数据有比较重要的应用, 但数据的可靠性却难以满足应用要求. 从 ENDF/B-VI 库 [7] 到 ENDF/B-VII.0 [8] 库再到 ENDF/B-VII.1 [6] 库, ^9Be 核数据一直在“改进”中. 评价核数据基本源自微观的实验测量, 而微观测量较为困难, 测量结果存在较大的不确定度; 且一般难以获得完备的测量数据, 因而评价核数据难免具有较大的不确定度. 临界实验等中子学宏观积分实验相对于微观实验具有很高的测量精度, 常用于评判相关核数据的可靠性, 并指出核数据的改进方向. 为检验 ^9Be 的中子核数据, 开展了大量的铍反射层临界积分实验, 部分经评价形成基准实验, 收录于临界安全基准实验手册 [9]. 对于 ENDF/B 库 ^9Be 数据的改进,

不同的基准实验却给出近乎矛盾的评判结果.

我们主要利用 SURE 程序 [10] 的基于灵敏度分析与不确定度量化的核系统间相似性分析功能, 分析不同系列的铍反射层临界基准实验之间的自治性. 分析表明, 同系列的基准实验自治性较好, 而不同系列的高度相似的基准实验, 实验测量与模拟计算的对比存在近乎“矛盾”的结果. 需要开展相似的新实验, 或对原有实验进行细致的重新评价, 以给出自治、可信的基准实验, 满足核数据检验与改进的需求.

2 ENDF/B 库 ^9Be 核数据与基准实验中子有效增殖因数 k_{eff} 计算

ENDF/B 评价核数据库是世界范围内总体上最可靠的核数据库, 广泛应用于核工程与核科学领域. 下面以 ENDF/B 评价核数据库最近几个版本 (ENDF/B-VI, VII.0, VII.1) 的 ^9Be 核反应数据为例, 考查铍反射层基准实验的自治性, 以及积分实验对核数据改进的反馈.

主要介绍对 HMF058 和 HMF066 两系列铍反射层基准实验的考查. HMF058 系列, 1958—1959 年开展实验, 2003 年评价形成基准实验, 是不同厚度铍反射层的系列高富集铀 (HEU) 基准实验, 装置最内层为铍球, 向外依次为镍、HEU 壳层, 最外层

表2 HMF058 系列临界基准实验
 Table 2. HMF058 benchmark experiments.

代号	铍球半径 /cm	镍外径 /cm	空隙外径 /cm	HEU 外径 /cm	铍外径 /cm	铍反射层厚度 /cm	k_{eff} 实验值
HMF058.1	0.498	0.521	0.556	5.181	25.450	20.3	1±0.0026
HMF058.2	0.498	0.521	0.556	5.940	15.211	9.3	1±0.0035
HMF058.3	0.498	0.521	0.556	6.545	11.980	5.4	1±0.0027
HMF058.4	0.498	0.521	0.556	7.111	10.374	3.3	1±0.0021
HMF058.5	0.498	0.521	0.556	7.479	9.702	2.2	1±0.0033

表3 HMF066 系列临界基准实验
Table 3. HMF066 benchmark experiments.

代号	铍球半径 /cm	镍外径 /cm	空隙外径 /cm	铍外径 /cm	HEU 外径 /cm	铍外径 /cm	铍反射层厚度 /cm	k_{eff} 实验值
HMF066.1	0.4983	0.5207	0.5555	3.146	6.5445	15.2845	8.74	1.0030±0.0033
HMF066.2	0.4983	0.5207	0.5555	3.146	7.1105	12.3905	5.28	1.0023±0.0029
HMF066.3	0.4983	0.5207	0.5555	3.146	7.479	11.339	3.86	1.0023±0.0026
HMF066.4	0.4983	0.5207	0.5555	4.0895	6.5445	19.7445	13.2	1.0043±0.0043
HMF066.5	0.4983	0.5207	0.5555	4.0895	7.1105	14.9605	7.85	1.0030±0.0033
HMF066.6	0.4983	0.5207	0.5555	4.0895	7.479	13.119	5.64	1.0028±0.0030
HMF066.7	0.4983	0.5207	0.5555	4.6975	7.479	15.149	7.67	1.0048±0.0039
HMF066.8	0.4983	0.5207	0.5555	4.6975	7.1105	17.7505	10.64	1.0039±0.0040
HMF066.9	0.4983	0.5207	0.5555	6.5445	9.139	14.629	5.49	1.0027±0.0036

为铍反射层(见表2). HMF066 系列, 1960 年开展实验, 2005 年评价形成基准实验. HMF066 的实验构型与 HMF058 相似, 只是镍镀层(空隙)和 HEU 活性层间增加了一个 2.6—6.0 cm 的铍壳层(见表3). HMF058 和 HMF066 系列实验所采用的材料基本相同.

2.1 ENDF/B-VI 库 ^9Be 核数据

1986 年, 劳伦斯利弗莫尔实验室的 Perking 为 ENDF/B-VI 库评价了 ^9Be 中子核数据. 评价主要基于 1970 年代前的实验数据, 主要反应道的截面和能量角分布都有部分实验数据. 后来在应用中发现 B-VI 库数据分析铍反射层临界基准实验模型(如 HMF058 系列)时, 中子有效增殖因数 k_{eff} 的计算值与基准实验值间存在显著的偏差.

图2给出了采用 ENDF/B-VI 数据(+MCNP

程序^[11])计算的 HMF058 系列实验 k_{eff} 的计算值 C 与实验值 E 的比值. 图2(a)为线性坐标系, 图2(b)横坐标轴取对数坐标. 可见, 计算值大多相对于实验数据偏大, 且偏差随铍反射层厚度的增加而呈现出明显增大的趋势. 从图2(b)可看出, 计算偏差随铍反射层厚度的对数大致呈线性增大(简称为铍的反射偏差). 如表2, 伴随铍反射层厚度的增加, HEU 壳层逐渐变薄, 计算偏差不可能由铀的数据造成. 因此, 推断 ^9Be 数据的缺陷是造成模拟计算偏差的原因.

表4 HMF058.1 基准实验 k_{eff} 对各核素的灵敏度系数
Table 4. The sensitivity coefficients of k_{eff} to each nuclide for HMF058.1 benchmark experiment.

	核素			
	^{235}U	^{234}U	^{238}U	^9Be
灵敏度	0.49	3.0×10^{-3}	6.6×10^{-3}	0.42

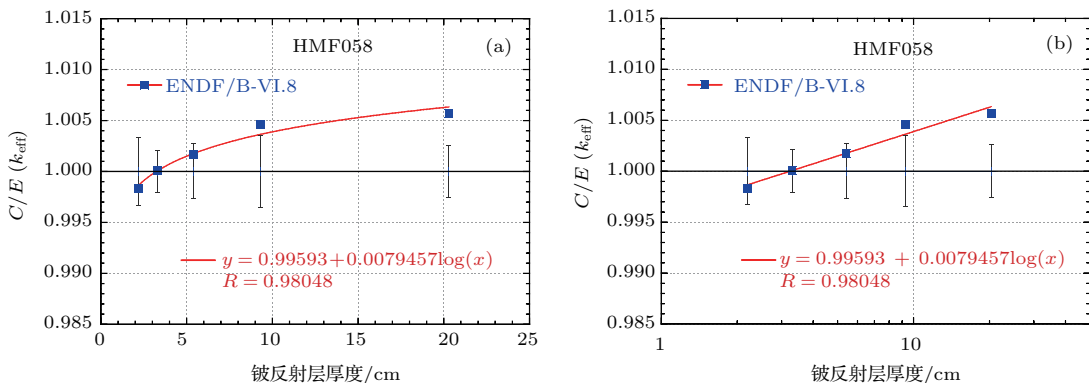


图2 ENDF/B-VI 库数据计算的 HMF058 系列基准实验的 k_{eff} 的 C/E 值
Fig. 2. C/E values for k_{eff} of HMF058 benchmark experiments calculated with ENDF/B-VI data.

表5 HMF058.1 基准实验 k_{eff} 计算对 ^9Be 各反应道截面的灵敏度系数

Table 5. The sensitivity coefficients of k_{eff} to each reaction of beryllium for HMF058.1 benchmark experiment.

反应道	弹散	(n, 2n)	俘获	(n, p)	(n, d)	(n, t)	(n, α)
灵敏度系数	0.397	3.87×10^{-2}	-7.90×10^{-3}	-4.30×10^{-9}	-2.92×10^{-9}	-1.30×10^{-6}	-8.26×10^{-3}
百分比	94.5%	9.2%	-1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	-2.0%

对HMF058系列临界实验的 k_{eff} 计算进行灵敏度分析,发现 k_{eff} 计算对铍反射层都较为灵敏.其中,铍反射层最厚的HMF058.1实验,铍的灵敏度与 ^{235}U 的灵敏度相当(见表4).HMF058.1实验的 k_{eff} 计算对 ^9Be 各反应道截面的灵敏度如图3所示,反应道的积分灵敏度见表5.可见,在0.1—1 MeV能域, ^9Be 数据的弹散截面有最大的正灵敏度,占主导地位.

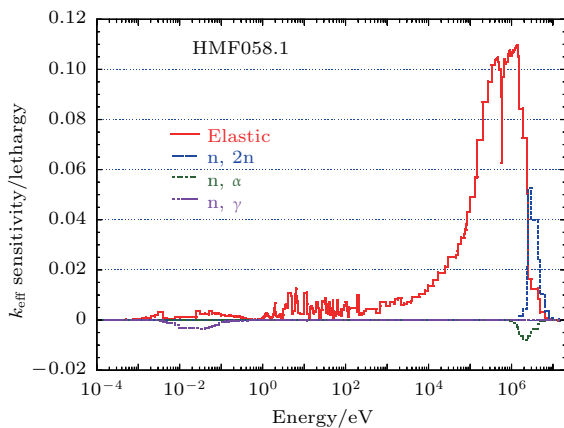


图3 (网刊彩色) HMF058.1 基准实验 k_{eff} 计算对反射层铍各反应道截面的灵敏度系数

Fig. 3. (color online) The sensitivity coefficients of k_{eff} to each reaction of beryllium for HMF058.1 benchmark experiment.

2.2 ENDF/B-VII.0库 ^9Be 核数据

在ENDF/B-VII.0评价库的研制中,为解决铍的反射偏差问题,采用单道R-矩阵分析方法对 ^9Be 的部分数据进行了重新评价,弹散截面有较显著的改变,如图4所示. ^9Be 数据改进后(在ENDF/B-VII.0发布),应用于HMF058系列基准实验的 k_{eff} 计算.如图5所示,数据的改进显著地改善了 k_{eff} 计算结果,消除了 k_{eff} 计算偏差随铍反射层厚度增大而增大的趋势(事实上,考虑到ENDF/B-VII.0库改进了 ^{235}U 的中子核数据,导致高富集铀裸装置Godiva的 k_{eff} 计算值较ENDF/B-VI.8的计算值增大0.3%左右[8], ^9Be 数据改变的影响较图5所示更为显著).

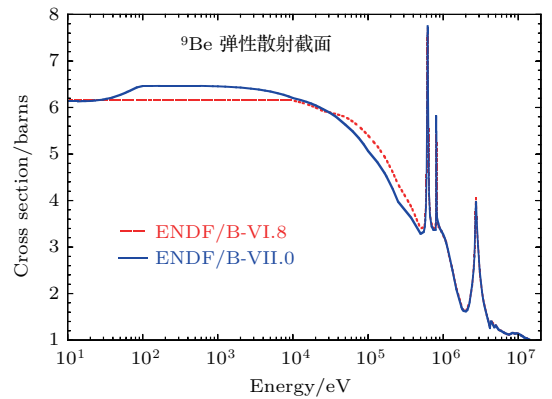


图4 (网刊彩色) ^9Be 的弹性散射截面(ENDF/B-VI.8-B-VII.0)

Fig. 4. (color online) The elastic scattering cross sections of ^9Be .

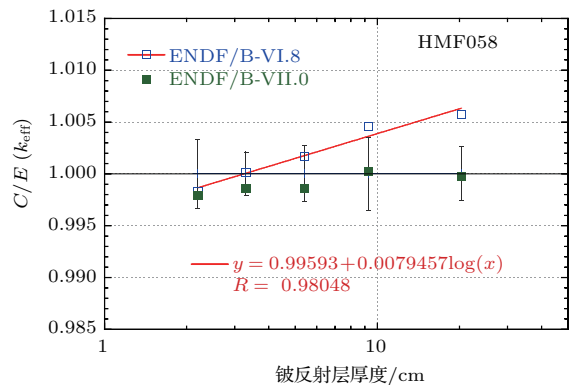


图5 ENDF/B-VII.0库数据计算的HMF058系列基准实验的 k_{eff} 的C/E值

Fig. 5. C/E values for k_{eff} of HMF058 benchmark experiments calculated with ENDF/B-VII.0 data.

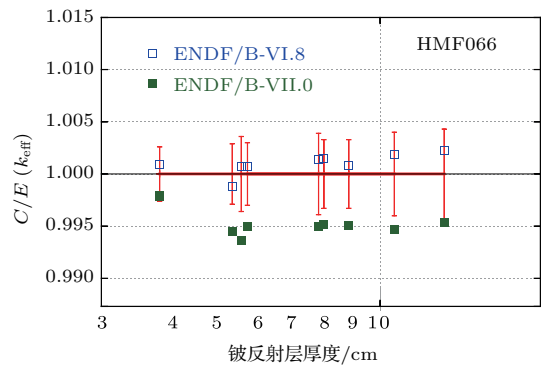


图6 HMF066系列基准实验的 k_{eff} 的C/E值

Fig. 6. C/E values for k_{eff} of HMF066 benchmark experiments.

然而, 当将“改进”的数据应用于计算相似的HMF066系列基准实验(见表3), 得到的结果却不如预期. 如图6所示, ENDF/B-VII.0的计算结果大多较实验数据偏低, 而B-VI.8的计算结果较好地符合了实验数据. 这与在HMF058计算中得到的结论“直接矛盾”.

2.3 ENDF/B-VII.1库⁹Be核数据

ENDF/B-VII.1采用了最新的实验数据, 对⁹Be的弹散截面数据做了重新评价. 如图7所示, B-VII.1计算的基准实验 k_{eff} 的 C/E 值与B-VI.8的计算结果接近. 对HMF058, 计算结果仍表现出明显的反射偏差; 但对HMF066, 结果更好地符合了实验数据. 可见, 对不同系列的临界积分实验计算, 最新的ENDF/B-VII.1数据有显著不同的表现.

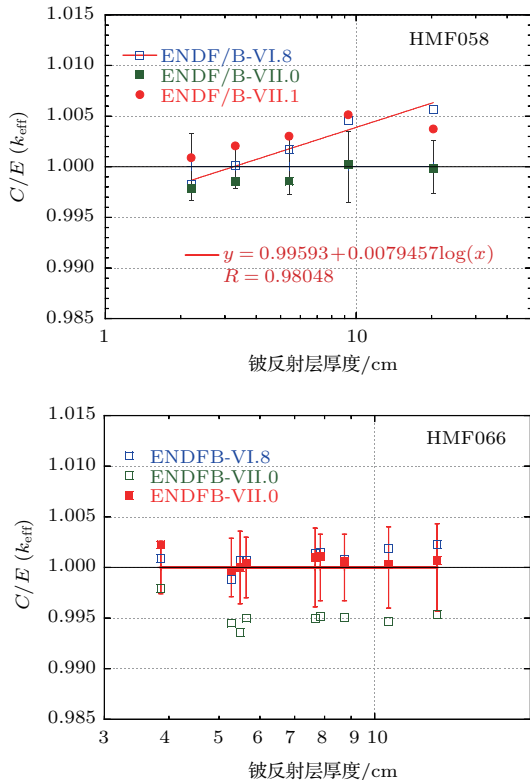


图7 ENDF/B-VII.1库数据计算的HMF058和HMF066系列基准实验的 k_{eff} 的 C/E 值

Fig. 7. C/E values for k_{eff} of HMF058 and HMF066 benchmark experiments calculated with ENDF/B-VII.1 data.

3 铍反射层基准实验相似度分析

利用灵敏度系数与不确定信息, 可以构建全面的核装置间中子学性质相似度指标, 常用的相似度

指标有 C_k 指标、 E 指标、 G 指标等^[12]. 这里, 利用 E 指标对HMF058和HMF066两系列积分实验进行相似度分析.

3.1 E 相似度指标

考虑 I 个核系统(如基准实验), 可利用灵敏度系数构造 E 相似度指标, 分析它们之间的相似度. 将每个核系统 k_{eff} 对核数据的灵敏度系数 $S_{k,\alpha}^i$ 视为一个 M 维向量, $M = \text{核素数} \times \text{反应道数} \times \text{能群数}$, 向量的模为 $|S_{k,\alpha}^i| = \sqrt{S_{k,\alpha}^{iT} S_{k,\alpha}^i}$. 则 i 和 j 系统的 E 相似度指标 E_{ij} 定义为两系统灵敏度向量 $S_{k,\alpha}^i$ 和 $S_{k,\alpha}^j$ 的方向余弦

$$E_{ij} \equiv \frac{S_{k,\alpha}^{iT} S_{k,\alpha}^j}{|S_{k,\alpha}^i| |S_{k,\alpha}^j|}. \quad (1)$$

E 指标越接近1, 两系统的灵敏度系数向量的方向越接近, 系统的相似度越高. $E_{ij} = 1$ 表示两系统的灵敏度系数向量平行, 指示系统完全相似; $E_{ij} = 0$ 表示两系统的灵敏度系数向量垂直, 指示系统完全不相似.

3.2 HMF058和HMF066系列基准实验间的相似度分析

如前所述, HMF058系列临界基准实验与HMF066系列临界基准实验的 k_{eff} 模拟计算的偏差表现出较大的差异. 总体上, HMF058与HMF066都是系列HEU堆芯、铍反射层装置, 应具有较高的中子学相似度. 将HMF058系列的5个实验和HMF066系列的9个实验作为一组核系统($I = 14$), 进行相似的分析. 先计算每个实验模型的 k_{eff} 对核数据的灵敏度系数, 然后计算实验模型间的相似度指标 E , 计算结果见表6.

利用 E 相似度指标, 从HMF066系列实验中, 分别遴选与HMF058系列各实验最为相似的实验, 结果如表7.

确定两系列间最为相似的实验后, 将最为相似的实验组成相似实验组. 对HMF058系列中的VII.1数据计算偏差较大的HMF058.1, HMF058.2, HMF058.3实验所在的相似组, 利用主流核数据库数据进行计算分析. 计算采用各库的⁹Be数据+ENDF/B-VII.1库的其他数据.

从图8可以看出, 相似组1包括HMF58.1和HMF066.1, HMF066.5, 采用各库数据计算, 不

同系列实验 k_{eff} 的 C/E 值差异均在 3%—5% 之间; 而同系列的 HMF066.1 与 HMF066.5 计算结果接近. 相似组 2 包括 HMF058.2 和 HMF066.6, HMF066.2, 计算结果类似相似组 1, 不同系列实验 k_{eff} 的 C/E 值计算偏差均在 5% 左右; 而同系列的 HMF066.6 与 HMF066.2 计算结果接近. 相似组 3 包括 HMF058.3 和 HMF066.3, 各数据计算结果的差异在 1% 以内.

高度相似的积分实验计算分析表明, 同系列高度相似的实验 (HMF066.1, HMF066.5 与 HMF066.6, HMF066.2), 采用不同数据, 计算差异不大; 而不同系列的高度相似实验, 特别是反射层厚度较大的相似组 1 和 2, 无论采用何种数据, 计

算结果的差异都较大, 且偏差值稳定.

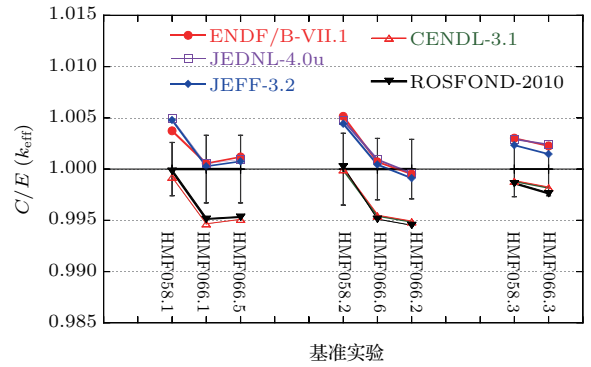


图 8 (网刊彩色) 高度相似实验的 k_{eff} 的 C/E 值计算对比
Fig. 8. (color online) The calculated C/E values for k_{eff} of highly similar experiments.

表 6 HMF058 和 HMF066 临界基准实验的 E 相似度指标

Table 6. The E similarity indexes between HMF058 and HMF066 criticality benchmark experiments.

	HMF 058.1	HMF 058.2	HMF 058.3	HMF 058.4	HMF 058.5	HMF 066.1	HMF 066.2	HMF 066.3	HMF 066.4	HMF 066.5	HMF 066.6	HMF 066.7	HMF 066.8	HMF 066.9
HMF058.1	1.0000													
HMF058.2	0.9916	1.0000												
HMF058.3	0.9765	0.9951	1.0000											
HMF058.4	0.9570	0.9832	0.9962	1.0000										
HMF058.5	0.9420	0.9724	0.9900	0.9985	1.0000									
HMF066.1	0.9940	0.9976	0.9873	0.9699	0.9558	1.0000								
HMF066.2	0.9829	0.9977	0.9983	0.9900	0.9810	0.9939	1.0000							
HMF066.3	0.9722	0.9928	0.9995	0.9968	0.9911	0.9849	0.9979	1.0000						
HMF066.4	0.9916	0.9779	0.9534	0.9244	0.9040	0.9887	0.9665	0.9487	1.0000					
HMF066.5	0.9929	0.9947	0.9821	0.9623	0.9468	0.9994	0.9906	0.9799	0.9916	1.0000				
HMF066.6	0.9880	0.9980	0.9933	0.9801	0.9682	0.9981	0.9983	0.9925	0.9785	0.9967	1.0000			
HMF066.7	0.9918	0.9912	0.9758	0.9536	0.9367	0.9979	0.9859	0.9733	0.9944	0.9995	0.9939	1.0000		
HMF066.8	0.9894	0.9785	0.9546	0.9258	0.9054	0.9897	0.9680	0.9503	0.9995	0.9930	0.9803	0.9959	1.0000	
HMF066.9	0.9889	0.9880	0.9717	0.9484	0.9310	0.9961	0.9829	0.9695	0.9941	0.9985	0.9919	0.9996	0.9962	1.0000

表 7 HMF066 系列中与 HMF058 最为相似的基准实验

Table 7. The most similar experiments in HMF066 to each experiment of HMF058.

	相似组 1	相似组 2	相似组 3	相似组 4	相似组 5
HMF058 系列	HMF058.1	HMF058.2	HMF058.3	HMF058.4	HMF058.5
HMF066 系列	HMF066.1	HMF066.6	HMF066.3	HMF066.3	HMF066.3
E 指标	0.9940	0.9980	0.9995	0.9968	0.9911
HMF066 系列	HMF066.5	HMF066.2	HMF066.2	HMF066.2	—
E 指标	0.9929	0.9977	0.9983	0.9900	—

E 值非常接近 1 的两个基准实验, 其灵敏度系数向量接近平行, 且相似的实验灵敏度向量的模值也很接近, 因此两实验 k_{eff} 计算对核数据的灵敏度系数也十分接近 ($S_{k,\alpha}^1 \sim S_{k,\alpha}^2$). 相似实验 HMF058.1 与 HMF066.1 的 k_{eff} 对 ${}^9\text{Be}$ 核数据的灵敏度系数如图 9 所示.

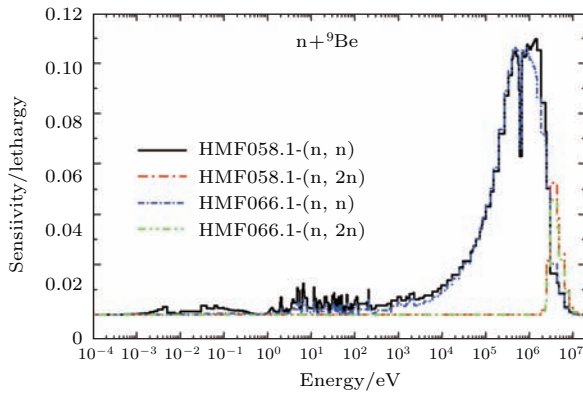


图 9 (网刊彩色) HMF058.1 与 HMF066.1 基准实验 k_{eff} 计算对反射层铍核数据的灵敏度系数

Fig. 9. (color online) The sensitivity coefficients of k_{eff} to nuclear data of beryllium for HMF058.1 and HMF066.1 benchmark experiments.

若对核数据进行改进, 相对改变量为 $\delta\alpha$, 两高度相似实验的 k_{eff} 计算值分别改变为

$$k_{\text{eff}}^{1'} = k_{\text{eff}}^1(1 + \delta k_{\text{eff}}^1),$$

$$k_{\text{eff}}^{2'} = k_{\text{eff}}^2(1 + \delta k_{\text{eff}}^2).$$

根据灵敏度的定义, k_{eff} 的相对变化量可分别表示为

$$\delta k_{\text{eff}}^1 = S_{k,\alpha}^1 \cdot \delta\alpha,$$

$$\delta k_{\text{eff}}^2 = S_{k,\alpha}^2 \cdot \delta\alpha.$$

由于灵敏度系数十分接近, k_{eff} 计算值的改变量也十分接近 ($\delta k_{\text{eff}}^1 \sim \delta k_{\text{eff}}^2$), 亦即无法通过改进核数据来同时改进 HMF058 和 HMF066 系列装置的 k_{eff} 计算. 显示 HMF058 或 (和)HMF066 测量或评价可能存在系统性的偏差.

4 结 论

考查了 ENDF/B 评价核数据库从 ENDF/B-VI 版到 B-VII.1 版 ${}^9\text{Be}$ 数据的发展历程. 将数据代入铍反射层临界积分实验 k_{eff} 的模拟计算, 对比了计算值与实验值. 对 HMF058 系列和 HMF066 系

列铍反射层临界积分实验利用灵敏度系数进行了相似度分析. 得到的主要结论如下.

HMF058 或 (和) HMF066 系列基准实验的测量或评价可能存在系统性疏失: 相似性理论分析与模拟计算都表明, 无论如何改进核数据, 都无法同时改进 HMF058 和 HMF066 系列基准实验的模拟计算.

ENDF/B 库 ${}^9\text{Be}$ 数据虽多次改进, 但 ENDF/B-VII.1 库 ${}^9\text{Be}$ 数据仍不能很好地描述现有的铍反射层临界积分实验, 在 HMF058 的 k_{eff} 计算中, 仍表现出明显的反射偏差, 主要评价核数据库的 ${}^9\text{Be}$ 数据也存在较大的分歧.

尽管目前已有较多的铍反射层临界积分实验, 但 k_{eff} 的基准实验值的不确定度偏大, 多在 2%—5% 之间. 开展新的铍反射层积分实验, 获取高精度的实验数据, 有利于澄清 HMF058 系列和 HMF066 系列实验间的分歧, 有利于改进 ${}^9\text{Be}$ 中子核数据的评价.

参考文献

- [1] Trkov A, Herman M, Brown D A 2012 *ENDF-6 Formats Manual* (USA: National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory) Report BNL-90365-2009 Rev. 2 (CSEWG Document ENDF-102)
- [2] Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa T, Iwamoto N, Ichihara A, Kunieda S, Chiba S, Furutaka K, Otuka N, Oh-sawa T, Murata T, Matsunobu H, Zukeran A, Kamada S, Katakura J 2011 *J. Nucl. Sci. Technol.* **48** 1
- [3] Koning A J 2011 *J. Korean Phys. Soc.* **59** 1057
- [4] Ge Z G, Zhao Z X, Xia H H 2011 *J. Korean Phys. Soc.* **59** 1052
- [5] Zabrodskaia S V, Ignatyuk A V, Koscheev V N 2007 *VANT, Nuclear Constants* **1-2** 3
- [6] Chadwick M B, Herman M, Oblozinsky P, Dunn M E, Danon Y, Kahler A C, Smith D L, Pritychenko B, Arbanas G, Arcilla R, Brewer R, Brown D A, Capote R, Carlson A D, Cho Y S, Derrien H, Guber K, Hale G M, Hoblit S, Holloway S, Johnson T D, Kawano T, Kiedrowski B C, Kim H, Kunieda S, Larson N M, Leal L, Lestone J P, Little R C, McCutchan E A, MacFarlane R E, MacInnes M, Mattoon C M, McKnight R D, Mughabghab S F, Nobre G P A, Palmiotti G, Palumbo A, Pigni M T, Pronyaev V G, Sayer R O, Sonzogni A A, Summers N C, Talou P, Thompson I J, Trkov A, Vogt R L, van der Marck S C, Wallner A, White M C, Wiarda D, Young P G 2011 *Nucl. Data Sheets* **112** 2887
- [7] CSEWG-Collaboration <http://www.nndc.bnl.gov/endl/> [2016-9-5]

- [8] Chadwick M B, Oblozinsky P, Herman M, M Greene N, McKnight R D, Smith D L, Young P G, MacFarlane R E, Hale G M, Frankle S C, Kahler A C, Kawano T, Little R C, Madland D G, Moller P, Mosteller R D, Page P R, Talou P, Trelue H, White M C, Wilson W B, Arcilla R, Dunford C L, Mughabghab S F, Pritychenko B, Rochman D, Sonzogni A A, Lubitz C R, Trumbull T H, Weinman J P, Br D A, Cullen D E, Heinrichs D P, McNabb D P, Derrien H, Dunn M E, Larson N M, Leal L C, Carlson A D, Block R C, Briggs J B, Cheng E T, Huria H C, Zerkle M L, Kozier K S, Courcelle A, Pronyaev V, van der Marck S C 2006 *Nucl. Data Sheets* **107** 2931
- [9] Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency 1999 *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments* NEA/NSC/DOC(95)03
- [10] Hu Z H, Wang J, Sun W L, Li M S 2013 *Atom. Energy Sci. Technol.* **47** 25 (in Chinese) [胡泽华, 王佳, 孙伟力, 李茂生 2013 原子能科学技术 **47** 25]
- [11] X-5 Monte Carlo Team 2003 *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume 1: Overview and Theory* (USA: Los Alamos National Laboratory) LA-UR-03-1987
- [12] Broadhead B L, Rearden B T, Hopper C M, Wagschal J J, Parks C V 2004 *Nucl. Sci. Eng.* **146** 340

Analysis of criticality benchmark experiments with beryllium reflectors*

Hu Ze-Hua¹⁾²⁾ Yin Yan-Peng^{3)†} Ye Tao¹⁾

1) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

2) (*Software Center for High Performance Numerical Simulation, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

3) (*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 19 January 2016; revised manuscript received 8 August 2016)

Abstract

Beryllium is an important nuclear material, and the reliability of the data for neutron-induced nuclear reactions of beryllium is of significant importance for nuclear engineering. The evaluated nuclear data for beryllium have been “improving” from ENDF/B-VI to ENDF/B-VII.0 and then to ENDF/B-VII.1. The comparisons between the calculated and experimental results of the criticality benchmark experiments are the essential means to test the reliability of nuclear data and indicate the direction of the improvement of nuclear data. There are several series of criticality benchmark experiments with beryllium reflector available for testing beryllium nuclear data. However, the calculated results are not consistent across these benchmarks. Two series of these benchmarks that are similar to each other, namely HMF058 and HMF066, are selected for discussion. HMF058 and HMF066 are both highly enriched metal fast benchmarks, with five cases of experiments in HMF058 benchmark and nine in HMF066. With ENDF/B-VII.1 cross sections, a clearly increasing C/E k_{eff} bias is observed with increasing beryllium reflector thickness for the five cases in HMF058 benchmark, while using ENDF/B-VII.0 cross sections, all the C/E values for k_{eff} remain within the experimental uncertainty. However, HMF066 are calculated very well with ENDF/B-VII.1 cross sections, but a bias of about 500 pcm is observed with ENDF/B-VII.0 data. These results are particularly puzzling since there is little difference between the configurations of HMF058 and HMF066, so the quality of beryllium nuclear data cannot be evaluated and the direction for improvement cannot be figured out either. The similarity method, based on the use of sensitivity coefficients calculated by sensitivity and uncertainty code SURE, is used to analyze the similarity between two series of benchmark experiments. First, the neutronics similarity index between each pair of the total of fourteen cases of experiments from the two benchmarks is calculated. Then, the most similar experiments from HMF066 to each case of the five experiments from HMF058 are selected by similarity index, and the experiments are grouped into five “similarity suites”, each with one from HMF058 and the others from HMF066. The experiments in the same similarity suite are highly similar to each other on neutronics. In a similarity suite, the deviations of calculated results and experimental values are disagreed for experiments from different series, but the deviations agree with each other for experiments from the same series. This shows that the agreement between the calculated results and experimental values cannot be improved by revising the nuclear data. It is necessary to carry out the detailed reevaluation of the benchmark experiments, or to develop reliable new integral experiments to exclude unreliable experiments, in order to avoid the misleading of the nuclear data testing.

Keywords: criticality benchmark experiment, neutron multiplication factor, similarity analysis, neutron nuclear reaction data

PACS: 28.20.-v, 28.20.Gd, 28.41.-i, 28.41.Ak

DOI: 10.7498/aps.65.212801

* Project supported by the Foundation of Key Laboratory of Neutron Physics of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2013AA02), the Sub-item of Special Projects of the National Energy Bureau, China (Grant No. 2015ZX06002008), and the National Magnetic Confinement Fusion Energy Research Project, China (Grant No. 2015GB108002).

† Corresponding author. E-mail: 149913022@qq.com