

基于 WIMS-D 库燃耗数据的更新与基准验证

肖 向¹ 吴 军¹ 龚 游¹ 杨全瑞² 董正云³ 陈义学^{1,2}

1 (华北电力大学 核科学与工程学院 北京 102206)

2 (国家核电技术有限公司 北京软件技术中心 北京 100029)

3 (中国科学院核能安全技术研究所 合肥 230000)

摘要 随着 AP1000 等新一代压水堆的发展, 燃耗深度在不断提高, 平均卸料燃耗深度提高到 $60 \text{ GW d} \cdot \text{t}^{-1}$ 。然而, 传统使用的 WIMS69 群和 XMAS172 群 WIMS-D 格式多群常数库, 其能群结构存在共振峰重叠, 核素种类较少, 裂变产物产额的偏差较大, 并且伪裂变产物中包含的核素种类较多而导致 ^{152}Gd 、 ^{160}Gd 、 ^{159}Tb 、 ^{160}Tb 等重要核素无法得到精确处理等问题。因此, 本文主要针对 AP1000 等新一代反应堆的设计以及运行特点, 基于 ENDF/B-VII.1 库, 并且在现有基础上针对 WIMS-D 库中的伪裂变产物、裂变产物燃耗链以及裂变产物产额等燃耗数据进行更新, 再通过 NJOY 程序开发了 SHEM281 群 WIMS-D 格式多群常数库。通过 DRAGON 程序挂载该 WIMSD281 库, 对其进行临界和燃耗两方面基准验证。计算结果表明, 该数据库的计算结果与基准值符合较好, 精度较高, 结果可靠, 可初步用于压水堆的相关计算。

关键词 SHEM281, 伪裂变产物, 裂变产物链, 裂变产物产额

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110602

Burnup information updating and verification based on WIMS-D library

XIAO Xiang¹ WU Jun¹ GONG You¹ YANG Tongrui² DONG Zhengyun³ CHEN Yixue^{1,2}

1(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

2(National Nuclear Power Technology Co., Ltd, Beijing Software Technology Center, Beijing 100029, China)

3(Institute of Nuclear Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, China)

Abstract Background: With the development of AP1000, the burnup has been raised constantly and the average burnup is expected to reach $60 \text{ GW d} \cdot \text{t}^{-1}$. However, the traditional WIMS-D library which is based on WIMS69 and XMAS172 energy group structure, has too many flaws such as the resonance overlap effect, lack of some nuclides, unreliable value of the fission product yield and thus can't explicitly treat the nuclide of ^{152}Gd , ^{160}Gd , ^{159}Tb and ^{160}Tb in the pseudo fission product. **Purpose:** A new version of WIMS-D library based on ENDF/B-VII.1 with SHEM281 group structure is developed to improve the accuracy of cell calculation using the NJOY program. **Methods:** The new library is verified through the analysis of criticality and burnup benchmarks by using DRAGON program. **Results:** The results show that the calculation values are in good agreement with the benchmark. **Conclusion:** The new library has high precision and the result is reliable, which can be used for the PWR's calculation.

国家自然科学基金(No.11275070)、国家科技重大专项(No.2011ZX06004-024-06-03-00)、中央高校基本科研业务费专项(No.2014MS51)资助

第一作者: 肖向, 男, 1993 年出生, 2015 年毕业于湖北科技学院, 现为硕士研究生, 研究领域为核数据库的开发与截面处理

通信作者: 吴军, E-mail: wujun2007@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-28, 修回日期: 2017-05-12

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11275070), National Research and Development Projects (No.2011ZX06004-024-06-03-00), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2014MS51)

First author: XIAO Xiang, male, born in 1993, graduated from Hubei University of Science and Technology in 2015, master student, focusing on the development of nuclear data library and cross section processing

Corresponding author: WU Jun, E-mail: wujun2007@ncepu.edu.cn

Received date: 2017-03-28, accepted date: 2017-05-12

Key words SHEM281, Pseudo fission product, Fission product chain, Fission product yield

目前广泛使用的堆芯物理库是国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 在 2007 年发布, 基于 WIMS69 群和 XMAS172 群的 WIMS-D 库, 其数据来源主要是 ENDF/B-VI.7、JENDL-3.2、CENDL-3、JEFF-2.2 等。XMAS172 能群结构克服了 WIMS69^[1]的一些缺点, 更适用于 MOX (Mixed Oxide Fuel) 燃料和深燃耗问题等计算。但是 XMAS172 没有考虑共振峰之间的相互影响, 限制了计算精度的进一步提高。因此, 为了克服上述两种能群结构的缺点, 法国原子能机构以及加拿大蒙特利尔大学提出了 SHEM281^[2]的能群结构, 它能精确描述铀系核素及其主要裂变产物在 23 eV 以下的共振峰, 减小由于共振峰重叠而引入的误差。

随着燃耗深度的提高, 裂变产物积累较多, 各产物之间的转化过程变得更为复杂, IAEA 在 2003 年发布的 WIMS-D Library Update^[3]中提出, 燃耗数据制作方法会引入较大误差, 并且该燃耗数据的评价库来源较为陈旧, 限制了计算精度的进一步提高。

本文主要基于 ENDF/B-VII.1 库, 采用 SHEM281 能群结构, 结合 AP1000 等新一代反应堆的特点, 通过截面处理程序 NJOY^[4], 制作 WIMS-D 格式的多群常数库。目前, 已制作好的 WIMSD281 库已经进行了金属铀、氧化铀和 MOX 燃料临界基准题的验证^[5], 计算精度较高, 结果可靠。本文主要针对该数据库中的燃耗数据进行更新, 最后通过 DRAGON 程序^[6]对该数据库进行进一步临界和燃耗验证, 基准题的选取主要针对 AP1000 反应堆。

1 燃耗数据更新

在 WIMS 库中, 燃耗数据是每种核素在发生核反应时的变化, 主要包含: 1) 铀系核素的裂变能;

2) 铀系核素、裂变产物以及可燃毒物的燃耗链; 3) 裂变产物和伪裂变产物的 ID 及其产额。在 IAEA 提供的 WIMS69 群库中, 包含燃耗数据的核素一共有: 57 个裂变产物、3 个伪裂变产物 (1 个平均的伪裂变产物、1 个 ^{232}U 的伪裂变产物和 1 个 ^{237}U 的伪裂变产物)、7 个可燃毒物、24 个铀系核素。本文主要针对伪裂变产物的重构、裂变产物燃耗链的优化及裂变产额的计算进行着重阐述。

1.1 伪裂变产物重构

铀系核素在发生裂变反应时往往会生成上千种裂变产物, 其中一部分核素对反应性有显著影响。另一部分核素单独作用对反应性的影响不大, 但是其整体对反应性的影响却是不可忽略的。在工程计算中, 习惯将后者作为一种“裂变产物”来处理, 一般将其称为假想集总裂变产物, 俗称伪裂变产物^[7]。

随着 AP1000 等新一代反应堆的发展, 新型低价值控制棒中子吸收体材料主要采用铽 (Tb) 和镝 (Dy) 这两种核素制成^[8], 以及采用钆 (Gd) 作为可燃毒物棒进行反应性控制^[9]。然而, IAEA 提供的伪裂变产物中包含 79 个核素, 但是这些核素却包含着目前 AP1000 等新一代反应堆需要着重考虑的核素, 如 ^{159}Tb 、 ^{160}Tb 、 ^{152}Gd 、 ^{160}Gd 这 4 个核素。因此, 需要针对现阶段反应堆的运行特点, 重新制作一版伪裂变产物。

图 1 是采用 SHEM281 能群结构, 按照 IAEA 提供的核素而制作的 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 下, 对应伪裂变产物之间截面对比图。通过分析可以看出, ^{238}U 的伪裂变产物在 1–100 eV 内有很大的偏差, 而通过这样的伪裂变产物制作出来的平均伪裂变产物, 会对计算结果引入较大的误差。

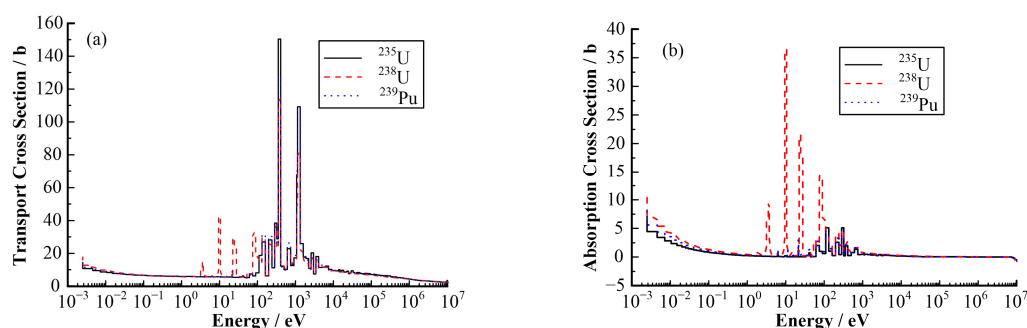


图 1 不同伪裂变产物核素输运截面(a)和吸收截面(b)对比
Fig.1 Transport cross section (a) and absorption cross section (b) of the different old pseudo fission products.

图 2 是采用 SHEM281 能群结果, 在 IAEA 的基础上去掉 ^{159}Tb 、 ^{160}Tb 、 ^{152}Gd 、 ^{160}Gd 这 4 个核素后, 制作的 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 下对应伪裂变产物之间截面对比图。通过分析可以看出, 对比 IAEA 制

作出来的伪裂变产物来说, 去除这 4 个核素后制作出来的伪裂变产物之间的截面偏差较小。因此, 去除 ^{159}Tb 、 ^{160}Tb 、 ^{152}Gd 、 ^{160}Gd 这 4 个核素后制作出来的平均伪裂变产物, 能在一定程度上减小误差。

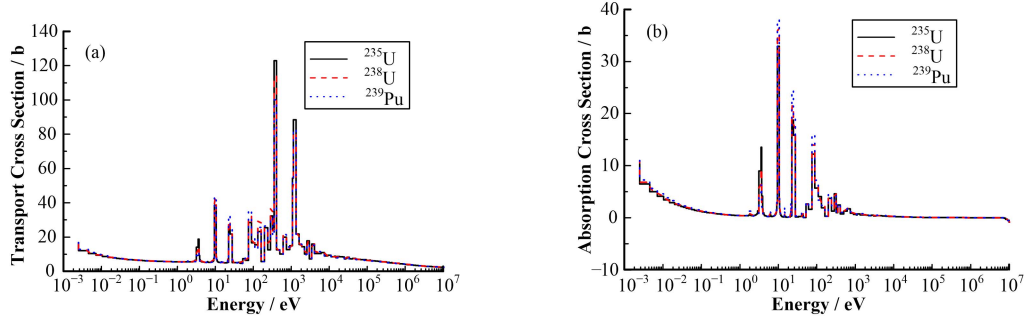


图 2 新不同伪裂变核素输运截面(a)和吸收截面(b)对比

Fig.2 Transport cross section (a) and absorption cross section (b) of the different new pseudo fission products.

1.2 裂变产物燃耗链优化

在核反应堆堆芯中发生核裂变将产生大量的裂变产物, 部分核素的裂变产物有上千种。如果将每一种裂变产物都进行精确计算, 则会花费大量时间, 这在工程计算中是不可行的。因此, 在工程计算中只选择对反应性影响较大的裂变产物做精确计算。然而, 由于在之前的伪裂变产物中减少了部分核素, 所以需要针对这几个额外添加的裂变产物制作出一

个新的裂变产物链。由于额外增加的裂变产物为: ^{159}Tb 、 ^{160}Tb 、 ^{152}Gd 、 ^{160}Gd , 因此, 只要制作与这 4 个核素有关的裂变产物链即可。目前, 这 4 个核素相关的完整燃耗链如图 3 所示。由于 ENDF/B-VII.1 库缺少 ^{159}Gd 、 ^{161}Gd 、 ^{161}Tb 相关的评价核数据, 所以本文在完整燃耗链的基础上通过简化省略得到一个裂变产物燃耗链, 如图 4 所示。

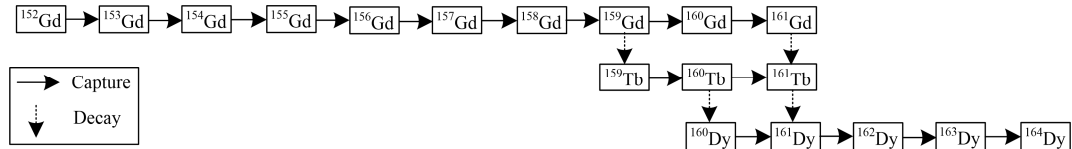


图 3 完整燃耗链

Fig.3 The complete burnup chain.

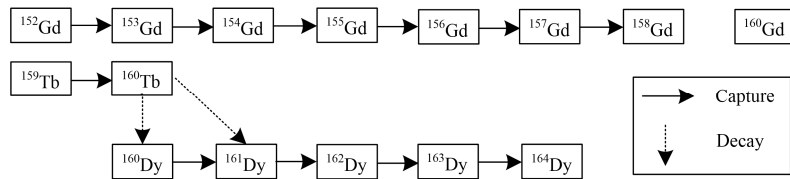


图 4 简化燃耗链

Fig.4 The simplified burnup chain.

1.3 裂变产物产额计算

裂变产额与入射中子能量有关, 随着入射中子能量变化, 裂变产额会随之改变。WIMS 库采用的是平均裂变产额, 通过 AVRFPY 程序^[10]提取。AVRFPY 程序在计算平均产额过程中, 将中子能群划分为三群, 其能量范围分别为: 10^{-5} – 5.5 eV、 5.5 eV– 0.1 MeV、 0.1 – 10 MeV。再根据裂变反应率

进行加权求解, 具体的裂变产物提取方法见图 5。

然而 IAEA69 和 IAEA172 两个库的数据来源为 ENDF/B-VI.8 库, 使得其计算出来的裂变产额数据过于陈旧, 会对最终计算结果引入一定的偏差。随着 ENDF/B-VII.1 库的发布, 需要针对新的评价核数据库计算出一版新的裂变产额数据。图 6 和 7 主要表示通过两种不同评价核数据库计算出来的 ^{235}U 裂变产额以及相对偏差, 通过分析可以知道, 不同

数据库计算出来的裂变产额偏差较大, 部分偏差甚至达到了 100%。因此, 在新的 ENDF/B-VII.1 库基

础上, 通过 AVRFPY 程序计算出来的新裂变产额替换 IAEA 提供的旧裂变产额是非常有必要的。

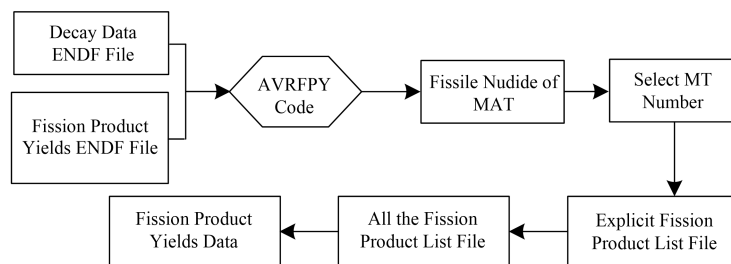


图 5 裂变产物产额的提取流程

Fig.5 The process of extracting the fission product yield.

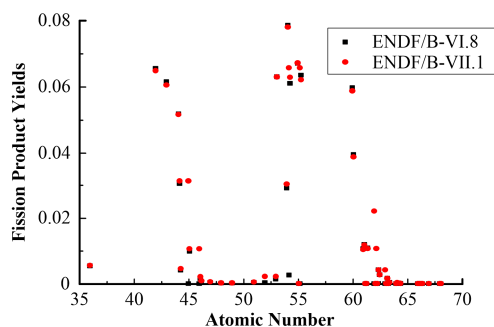


图 6 不同评价库下 ^{235}U 的裂变产物产额

Fig.6 The ^{235}U fission product yield of the different nuclear evaluation libraries.

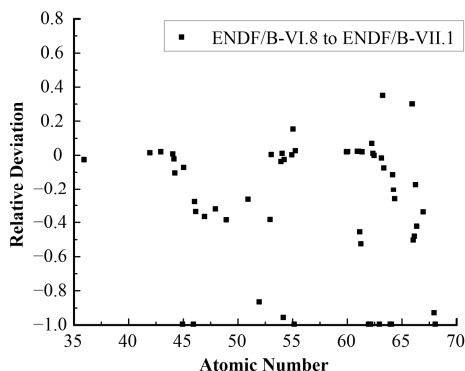


图 7 ^{235}U 裂变产物产额的相对偏差

Fig.7 The relative deviation of ^{235}U fission product yield.

2 基准验证

群常数库是在核评价库的基础上, 经过群常数制作程序处理得到的。然而, 此时的群常数库是未经验证以及确认的, 尚不能用于工程计算与科学研究。因此, 只有经过验证和确认的群常数才能用于工程设计与堆物理计算, 本文主要从临界计算和燃耗计算两方面进行验证。

由于 WIMSD281 库主要是为 AP1000 系列提供设计和研究用的多群常数库, 所以基准题的验证主要针对 AP1000 核反应堆。目前 AP1000 使用的燃

料组件^[11]主要有两种: 一种是由 264 根燃料棒、24 根导向管以及 1 根中子测量管组成; 另一种则是由 IFBA (Integral Fuel Burnable Absorber) 棒、燃料棒以及 WABA (Wet Annular Burnable Absorber) 棒组成。因此, 本文主要针对 AP1000 中的典型燃料棒栅元以及 IFBA 栅元为代表, 进行基准验证。

2.1 临界基准验证

临界基准验证主要反映着反应堆距离临界的程度, 选取的两种栅元结构均采用 UO_2 燃料, 几何模型如图 8、9 所示, 富集度分别为: 0.74%、1.58%、3.2%、3.4%、3.8%、4.0%、4.2%、4.4%、4.8%。通过 DRAGON 程序挂载 WIMSD281、IAEA69、IAEA172 多群常数库进行计算, 并且将其计算结果与 MCNP 程序^[12]进行对比。由表 1 可知, 在算 AP1000 典型栅元的 k_{inf} 时, WIMSD281、IAEA69、IAEA172 数据库的平均偏差分别为 -0.00654、-0.00786、-0.00469; 由表 2 可知, 在算 IFBA 栅元的 k_{inf} 时, WIMSD281、IAEA69、IAEA172 数据库的平均偏差分别为 -0.0047、-0.00352、-0.00138。

临界计算的过程中不涉及燃耗数据, 仅和多群常数库中的截面信息有关, 并且这两种栅元结构介质成分简单, 由于共振峰干涉效应所引入的误差相对较小, 所以偏差主要来自于 ^{235}U 和 ^{238}U 的截面数据。通过分析可知, 三种数据库的计算结果相对 MCNP 整体偏小, 误差可能来自两个方面: 1) DRAGON 程序采用 CPM (Collision Probability Method) 计算过程中引入了一些简化近似导致, 如栅元的等效、平通量密度近似等^[13]; 2) MCNP 程序采用的评价核数据库是 ENDF/B-VII.0 库, 而 WIMSD281 库采用的评价核数据库是 ENDF/B-VII.1 库, IAEA69 和 IAEA172 库则是基于 ENDF/B-VI.8 库制作而成, 这可能是不同评价核数据库之间的偏差所导致。

另一方面，IAEA172 的精度要比 WIMSD281 高 0.002 左右，这可能是由于 IAEA 采用 NRSC 程序^[14]针对 WIMS69 和 IAEA172 能群结构修正了高能区和共振能区的有效共振积分，从而导致其计算精度要高于能群结构更加优化的 SHEM281。因此，针对 WIMSD281 库的截面数据，还需要进行进一步研究改进。

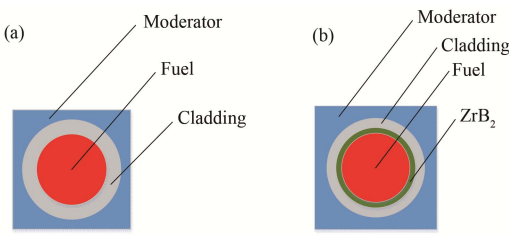


图 8 AP1000 典型栅元(a)与 IFBA 栅元(b)几何模型
Fig.8 Geometry model of AP1000 typical pin (a) and IFBA pin (b).

表 1 AP1000 典型栅元的 k_{inf}
Table 1 The k_{inf} of AP1000 typical pin.

富集度 Enrichment / %	DRAGON(281)	DRAGON(69)	DRAGON(172)	MCNP
0.74	0.750 807	0.748 928	0.750 265	0.756 500
1.58	1.024 028	1.021 543	1.023 622	1.032 250
3.20	1.234 343	1.232 685	1.235 816	1.241 660
3.40	1.249 549	1.248 035	1.251 261	1.255 100
3.80	1.276 150	1.274 934	1.278 446	1.283 230
4.00	1.287 868	1.286 802	1.290 388	1.294 160
4.20	1.298 681	1.297 775	1.301 513	1.305 420
4.40	1.308 726	1.307 981	1.311 828	1.313 990
4.80	1.326 752	1.326 365	1.330 383	1.333 470

表 2 IFBA 栅元的 k_{inf}
Table 2 The k_{inf} of IFBA pin.

富集度 Enrichment / %	DRAGON(281)	DRAGON(69)	DRAGON(172)	MCNP
0.74	0.391 693	0.392 403	0.393 361	0.394 000
1.58	0.608 253	0.608 844	0.610 193	0.613 330
3.20	0.855 234	0.856 223	0.858 306	0.860 800
3.40	0.877 012	0.878 076	0.880 251	0.882 810
3.80	0.916 726	0.917 952	0.920 325	0.922 090
4.00	0.934 893	0.936 210	0.938 640	0.939 280
4.20	0.952 050	0.953 464	0.956 017	0.957 270
4.40	0.968 322	0.969 831	0.972 475	0.972 220
4.80	0.998 373	1.000 105	1.002 902	1.003 080

2.2 燃耗基准验证

燃耗基准验证则主要是计算在不同燃耗点下的 k_{inf} 以及栅元内重要核素随燃耗深度的变化。本文同样针对 AP1000 典型栅元和 IFBA 栅元进行燃耗基准验证，几何模型如图 8 所示，仅选择富集度为 3.2% 和 4.8% 两种情况进行考虑。通过 DRAGON 程序挂载 WIMSD281、IAEA69、IAEA172 多群常数库进行计算，并将其计算结果与 SCALE 程序^[15]进行对

比。SCALE 程序是由美国橡树岭国家实验室开发的一个模块化程序系统，包含多种不同计算任务的程序模块，主要用于核临界安全分析、反应堆物理计算和辐射屏蔽计算等。采用 SCALE 程序系统中 TRITON 控制模块，选取基于 ENDF/B-VI 的 238 群截面库，调用 KENO 输运模块进行输运计算，再调用 ORIGIN-S 燃耗模块针对栅元、组件等进行燃耗计算。

图9和10主要展示了AP1000典型栅元和IFBA栅元在不同富集度中 k_{inf} 随燃耗的变化, AP1000典型栅元在燃耗寿期初时, WIMSD281的计算结果与SCALE符合得更好, 而IAEA69与IAEA172两个数据库的计算结果与SCALE偏差较大; IFBA栅元在整个燃耗寿期内, 这三种数据库的计算结果差别不大, 并且随着燃耗深度的增加, 结果与SCALE

偏差越来越大。这主要是因为: 1) 裂变产物较多, 可能需要考虑裂变产物的共振吸收; 2) 在燃耗过程中, 中子能谱是发生变化的, 采用怎样的能谱制作燃耗截面也对燃耗结果有较大影响; 3) 中子通量密度的间接影响等^[16]。这是在深燃耗区计算时, 所共同面临的主要问题, 本文暂不对此进行考虑。

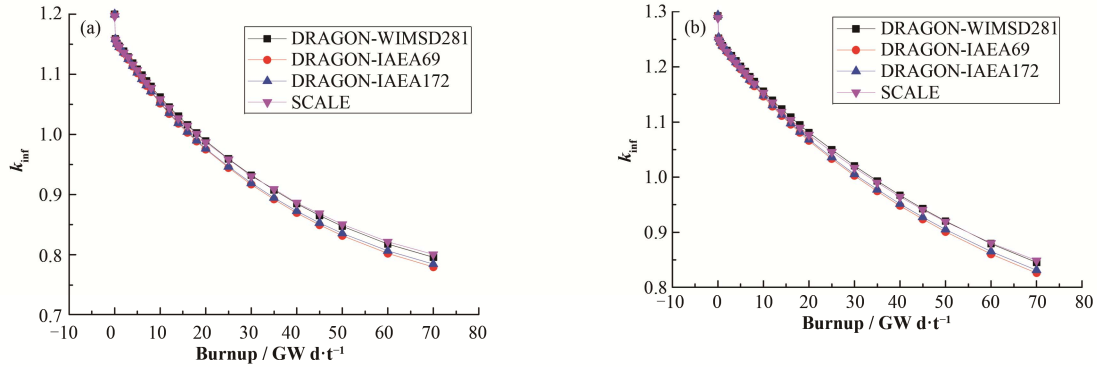


图9 AP1000典型栅元在燃料富集度为3.2% (a)和4.8% (b)时 k_{inf} 随燃耗的变化
Fig.9 The k_{inf} result of AP1000 typical pin between the fuel enrichment of 3.2% (a) and 4.8% (b).

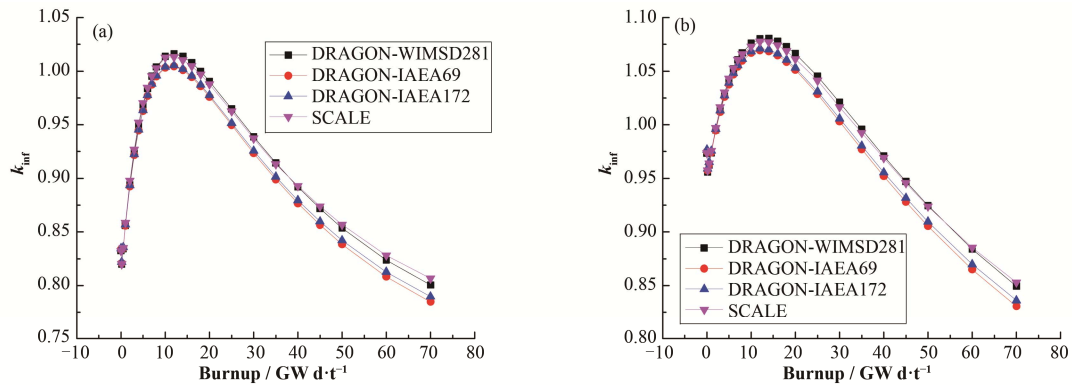


图10 IFBA栅元在燃料富集度为3.2% (a)和4.8% (b)时 k_{inf} 随燃耗的变化
Fig.10 The k_{inf} result of IFBA typical pin between the fuel enrichment of 3.2% (a) and 4.8% (b).

图11和12主要展示了AP1000典型栅元在不同富集度中主要锕系核素核子密度随燃耗的变化, 在计算 ^{235}U 和 ^{238}U 的核子密度时, 各数据库的计算结果与SCALE符合较好。在计算 ^{239}Pu 的核子密度时, WIMSD281的计算结果与SCALE符合得更好, 但是在计算 ^{240}Pu 的核子密度时, 各数据库的结果在寿期初时与SCALE符合较好, 但随着燃耗深度的增加, 各结果相对SCALE有些偏小。这同样是深燃耗区计算所共同面临的主要问题导致。

图13和14主要展示了IFBA栅元在不同富集度中主要锕系核素核子密度随燃耗的变化, 在计算 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{240}Pu 的核子密度时, 三种数据库的结

果与SCALE符合较好; 在计算 ^{239}Pu 的核子密度时, WIMSD281的计算结果与SCALE符合得更好。通过对比分析可知, WIMSD281库在计算 ^{239}Pu 和 ^{240}Pu 这两种核素时, 其精度要比IAEA69和IAEA172高。然而在深燃耗区内, IAEA69、IAEA172和WIMSD281的计算结果与SCALE偏差较大。由此可见, 在深燃耗区发生的核反应过程多而复杂, 采用IAEA在文献[3]中提出的燃耗数据会产生较多的问题。如果用于核素种类更多的MOX燃料计算中, 可能会产生更大的偏差。因此, 目前开发的WIMSD281多群截面库在深燃耗区计算仍具有一定的限制, 需要进一步改进。

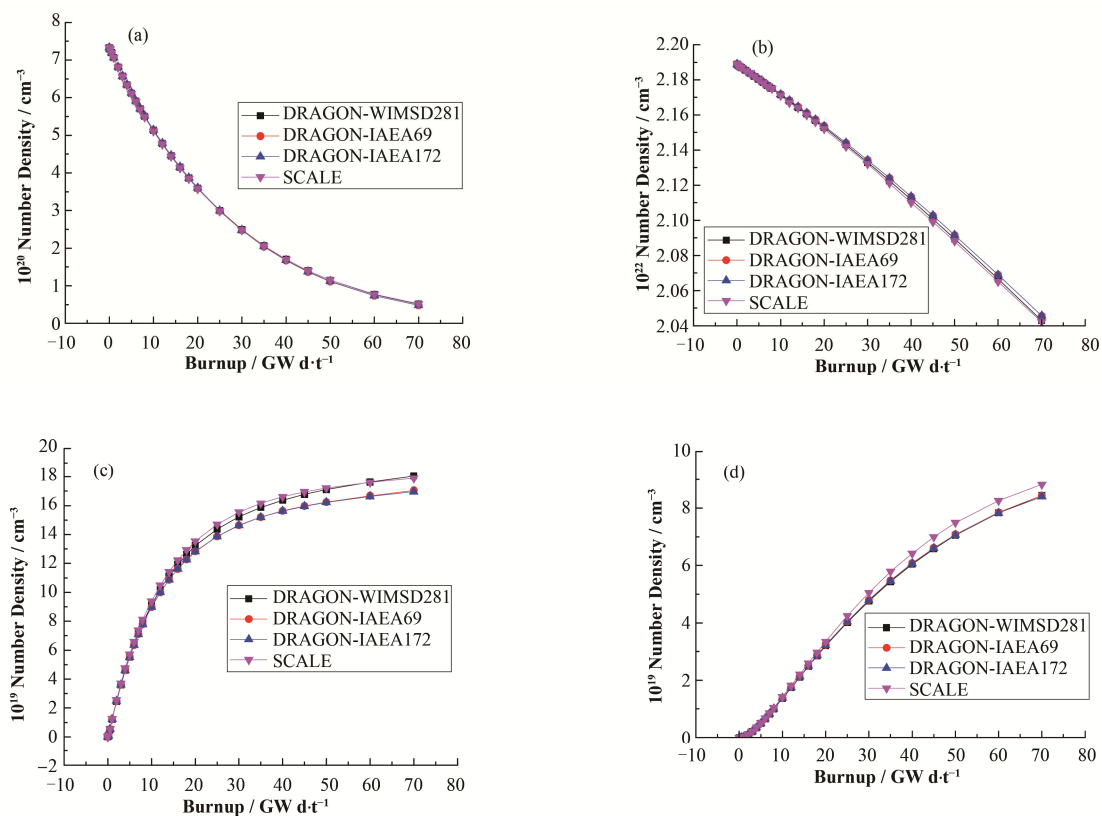


图 11 AP1000 典型栅元在燃料富集度为 3.2% 时, ^{235}U (a)、 ^{238}U (b)、 ^{239}Pu (c)、 ^{240}Pu (d) 核子密度随燃耗的变化
Fig.11 The number density of ^{235}U (a), ^{238}U (b), ^{239}Pu (c), ^{240}Pu (d) with the fuel enrichment of 3.2% in AP1000 typical pin.

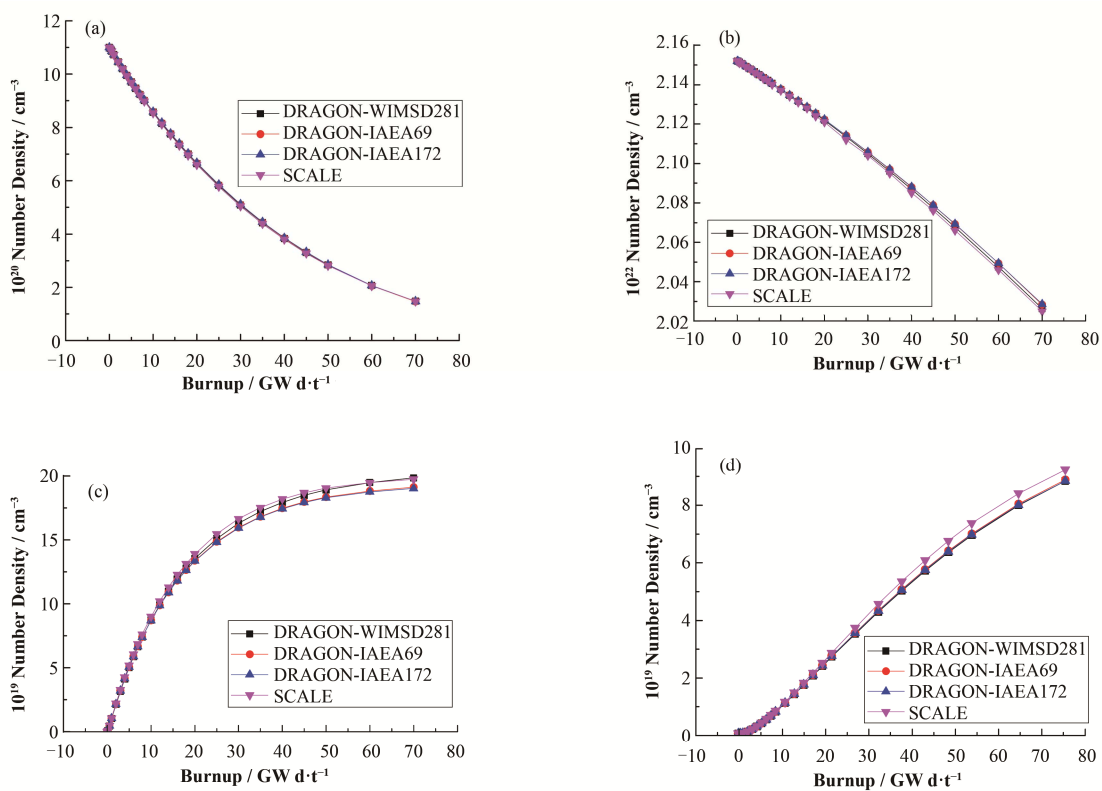


图 12 AP1000 典型栅元在富集度为 4.8% 时, ^{235}U (a)、 ^{238}U (b)、 ^{239}Pu (c)、 ^{240}Pu (d) 核子密度随燃耗的变化
Fig.12 The number density of ^{235}U (a), ^{238}U (b), ^{239}Pu (c), ^{240}Pu (d) with the fuel enrichment of 4.8% in AP1000 typical pin.

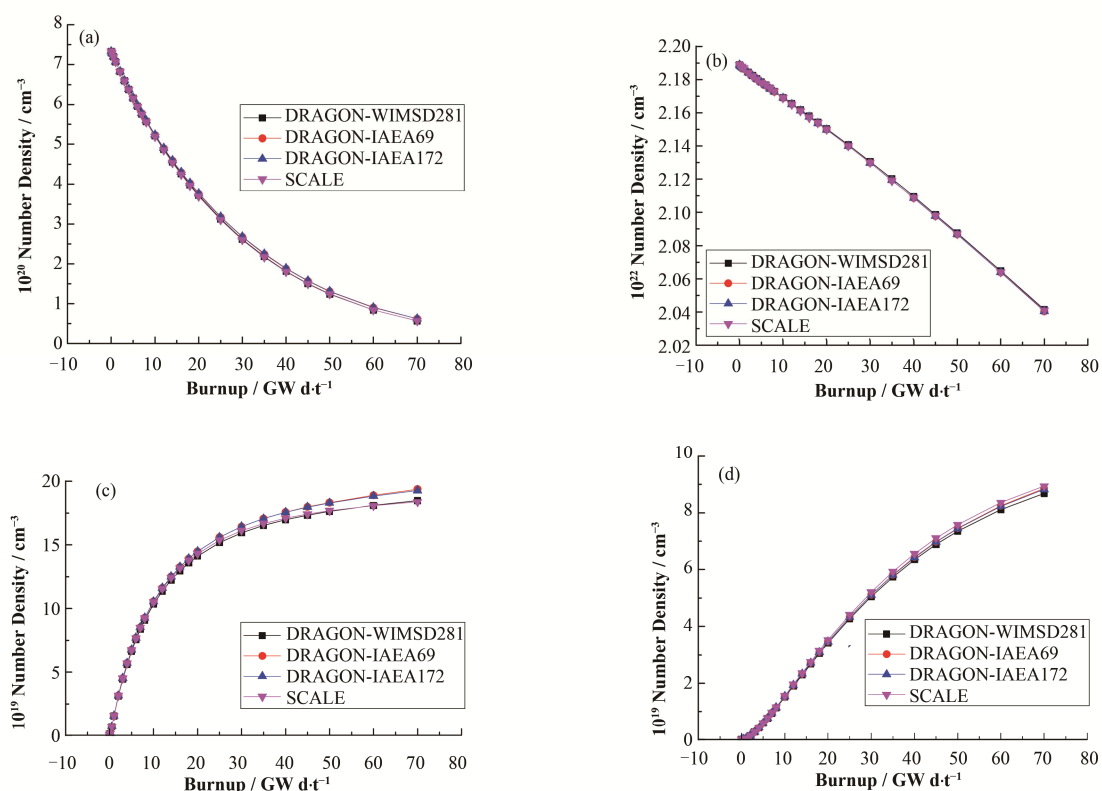


图 13 IFBA 栅元在富集度为 3.2% 时, ^{235}U (a)、 ^{238}U (b)、 ^{239}Pu (c)、 ^{240}Pu (d) 核子密度随燃耗的变化
Fig.13 The number density of ^{235}U (a), ^{238}U (b), ^{239}Pu (c), ^{240}Pu (d) with the fuel enrichment of 3.2% in IFBA pin.

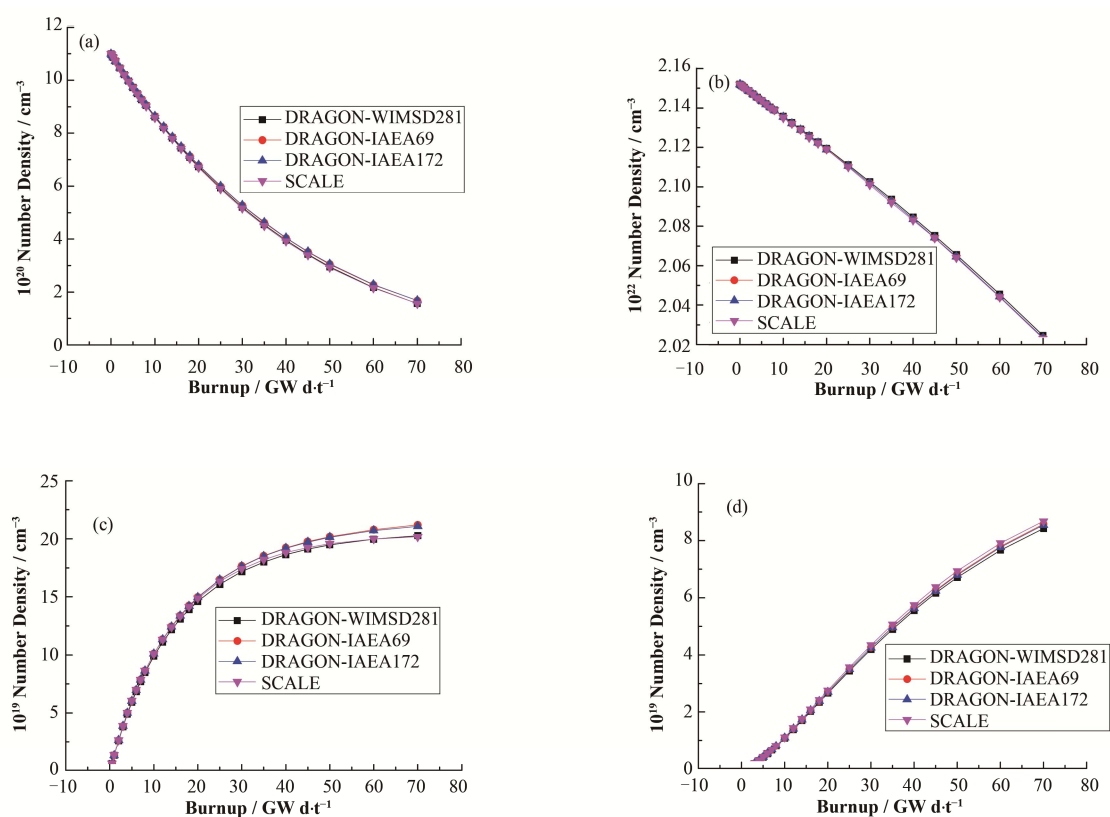


图 14 IFBA 栅元在富集度为 4.8% 时, ^{235}U (a)、 ^{238}U (b)、 ^{239}Pu (c)、 ^{240}Pu (d) 核子密度随燃耗的变化
Fig.14 The number density of ^{235}U (a), ^{238}U (b), ^{239}Pu (c), ^{240}Pu (d) with the fuel enrichment of 4.8% in IFBA pin.

3 结语

本文主要针对 AP1000 等新一代反应堆的运行以及设计特点, 在 IAEA 提供的 WIMS69 群和 XMAS172 群库基础上, 采用 SHEM281 能群制作出来的一版 WIMS-D 格式的多群常数库并且还将其燃耗数据进行更新, 主要针对 IAEA 在文献[3]中提出的伪裂变产物进行重构, 把之前的裂变产物燃耗链进行优化, 在 ENDF/B-VII.1 库的基础上重新计算裂变产物产额。本文还针对 AP1000 典型栅元以及 IFBA 栅元, 通过 DRAGON 程序挂载 WIMSD281、IAEA69、IAEA172 这三个多群常数库进行临界和燃耗基准验证, 并将其计算结果与 MCNP、SCALE 进行对比。通过临界基准验证可知, DRAGON 程序挂载 WIMSD281 库计算出来的 k_{inf} 相比 MCNP 程序有些偏小, 这可能是由于评价核数据库中 ^{238}U 的吸收截面偏大所导致。通过燃耗基准验证可知, 除了深燃耗区, DRAGON 程序挂载 WIMSD281 库的结果与 SCALE 程序相比, 计算精度较高, 结果可靠, 能适用于 AP1000 等新一代反应堆的研究和设计。

参考文献

- DAN G C, Robert C B, Yaron D, *et al.* Handbook of nuclear engineering: Vol.1: nuclear engineering fundamentals; Vol.2: reactor design; Vol.3: reactor analysis; Vol.4: reactors of generations III and IV; Vol.5: fuel cycles, decommissioning, waste disposal and safeguards[M]. Springer, 2010.
- Santamarina A, Hfaiedh N, Letellier R, *et al.* Advanced neutronics tools for BWR design calculations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, **238**(8): 1965–1974.
- Aldama D L, Leszczynski F, Trkov A. WIMS-D library update[R]. Final Report of a Co-ordinate Research Project, 2003.
- Macfarlane R E. A code system for producing pointwise and multigroup neutron and photon cross sections from ENDF/B evaluated nuclear data[R]. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory, USA Report PSR-171, 1987.
- Dong Z, Wu J, Ma X, *et al.* Development and verification of a 281-group WIMS-D library based on ENDF/B-VII.1[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, **91**: 189–194.
- Marleau G, Hébert A, Roy R. A user guide for DRAGON 3.06[R]. Report IGE-174 Rev, 2008: 7.
- Trkov A, Aldama D L. Definition of pseudo fission product data for reactor calculations[J]. Nuclear Energy in Central Europe, 1999, **99**: 57–62.
- 杨伟焱, 毕光文, 杨波, 等. 低价值控制棒中子吸收体材料燃耗相关数据的制作及验证研究[J]. 核科学与工程, 2014, (3): 369–376.
YANG Weiyan, BI Guangwen, YANG Bo, *et al.* Study on production and validation of low worth control rod material burnup calculation parameters[J]. Nuclear Science and Engineering, 2014, (3): 369–376.
- 胡也, 陈义学, 杨寿海, 等. 基于 Monte Carlo 方法的压水堆相关组件内热源计算与分析[J]. 核科学与工程, 2013, **33**(2): 168–174.
HU Ye, CHEN Yixue, YANG Shouhai, *et al.* Calculation and analysis of heat sour of PWR assemblies based on Monte Carlo method[J]. Nuclear Science and Engineering, 2013, **33**(2): 168–174.
- Trkov A. Processing of the fission product yield and decay data[J]. Nuclear Energy in Central Europe, 1999, **99**: 57–62.
- 曹博, 陈义学, 李晓静, 等. AP1000 典型燃料组件物理特性初步分析[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(增 2): 599–602. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0599.
CAO Bo, CHEN Yixue, LI Xiaojing, *et al.* Physical characteristics preliminary analysis on AP1000 fuel assembly[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(Suppl 2): 599–602. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0599.
- Brown F B. MCNP - a general Monte Carlo N - particle transport code[M]. Version 5. Oak Ridge, TN: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- 谢仲生, 尹邦华, 潘国品. 核反应堆物理分析[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
XIE Zhongsheng, YIN Banghua, PAN Guopin. The analysis of nuclear reactor physics[M]. Beijing: Atomic Energy Science and Technology, 1996.
- Leszczynski F. NRSC system, user's manual[R]. Internal Report CAB-CNEA, 1999.
- Bucholz J A. SCALE: a modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation[R]. TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1982.
- 马续波, 鲁凡, 陈义学, 等. 基于 cosRMC 的新一代 PWR 栅元和组件燃耗计算[J]. 原子能科学技术, 2016, **50**(11): 2010–2017. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.11.2010.
MA Xubo, LU Fan, CHEN Yixue, *et al.* Burnup calculation of next generation PWR cell and assembly based on cosRMC[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, **50**(11): 2010–2017. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.11.2010.