

聚变-裂变混合能源堆球模型中子学对算研究

邵增,程和平,刘国明

(中国核电工程有限公司,北京 100840)

摘要:利用蒙特卡罗程序和自主开发的蒙特卡罗-燃耗耦合程序 MOCouple-s,对北京应用物理与计算数学研究所提出的聚变-裂变混合能源堆球模型进行了对算研究。对初始时刻及各燃耗时刻下的有效增殖因数、能量倍增因子、氚增殖比、中子源强度等堆芯参数进行了比较,结果总体符合较好。对寿期末重要核素的成分进行了详细比较,除个别核素外,偏差很小,表明所采用的计算程序与核参数库一致性良好。对核参数库的选择、铀水体积比等对燃耗计算结果的影响进行敏感性分析,并对外中子源驱动的次临界堆芯的燃耗计算进行详细讨论,提出可行的燃耗计算基准。

关键词:混合堆;球模型;对算研究;燃耗;铀水体积比

中图分类号:TL46

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)03-0277-05

Comparative Study on Spherical Model of Fusion-Fission Hybrid Energy Reactor

SHAO Zeng, CHENG He-ping, LIU Guo-ming

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: The comparative study on fusion-fission hybrid spherical model proposed by the Institute of Applied Physics and Computational Mathematics was performed with Monte-Carlo code and MOCouple-s code. Comparisons of reactor parameters, such as neutron effective multiplication factor, energy multiplication factor, tritium breeding ratio and neutron source intensity, were made. The results agree well with the reference as a whole. The concentrations of important isotopes were also compared in detail. Most of the biases are very small except a tiny fraction of the isotopes. It proves that both codes and nuclear data library have very good consistency. In calculation of the model used, the burnup sensitivity of nuclear data and uranium-water ratio employed in the simulation model were analyzed. For such a fixed external source driven subcritical reactor core, detailed discussion was made about the burnup calculation method, and a feasible burnup calculation benchmark was proposed.

Key words: hybrid reactor; spherical model; comparative study; burnup; uranium-water ratio

核能已成为世界范围内的一种重要经济能源,其技术发展受到国家高度重视。作为向受控核聚变电站过渡的特殊堆型——聚变-裂变混合堆,在堆材料及工程技术可行性、核能源优化利用、安全性、经济性等方面具有独特的优势。在国家 973 ITER 计划配套专项支持下,国内已开展了大量初步设计研究工作。但各单位所使用的程序和核参数库各不相同,计算结果存在一定差异。为推动研究进展,北京应用物理与计算数学研究所(IAPCM)提出了球形混合堆模型,供各家单位对算,以确保所使用程序和数据库的正确性和可靠性。本文对该模型进行详细对算研究,并对影响燃耗计算结果的部分参数进行敏感性分析。针对外中子源驱动的次临界堆芯,详细讨论燃耗计算方法,提出合理可行的燃耗计算基准。

1 球对算模型

IAPCM 提出的球对算模型基本结构简单,采用半径 500 cm 的空腔模拟等离子体区域,其中均匀分布各向同性、能量 14.1 MeV 的中子源,向外依次为第一壁、裂变产能区、产氚区及屏蔽层,其中燃料包层共包含 6 个燃料层和 5 个冷却水层,铀水体积比约为 2.2。混合堆对算模型结构示意图于图 1。

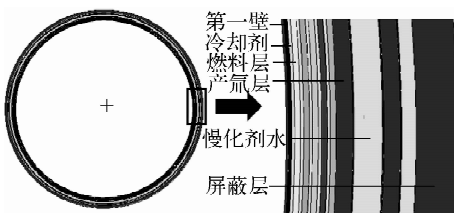


图 1 混合堆对算模型

Fig. 1 Benchmark model of hybrid reactor

该简化模型模拟了精确几何的混合堆堆芯所具有的一般特征,其中子学特性具有一定代表性,对算结果具有较强的说服力。

2 计算工具

本文对球模型的对算研究所采用的程序为可靠的蒙特卡罗程序和点燃耗程序的耦合程序 MOCouple-s^[1]。

MOCouple-s 程序是自主开发的自动化燃耗耦合程序,利用蒙特卡罗程序计算堆芯功率分布和各燃耗区重要核素的相关截面,替换点燃耗程序中重要核素的反应截面,并利用蒙特卡罗程序计算的各燃耗区的比功率进行燃耗计算,核素成分传递给蒙特卡罗程序进行下一步计算,如此反复,直到所有燃耗步计算完成。该程序适用于几乎所有类型反应堆的燃耗计算,通用性强,全自动运行,使用方便。经过对 OECD/NEA 压水堆燃耗基准题^[2]、ADS 基准题等进行验证^[3],MOCouple-s 程序关于反应性和核素成分的计算结果与实测结果和其他程序的计算结果符合良好,说明该程序完全适用于新一代先进反应堆的研究设计。

本文开展的对算研究所采用的核数据库为蒙特卡罗程序的自带截面库,绝大多数核素为 ENDF/B-VI 库,少数与温度相关的截面库是使用截面库加工程序处理生成的。

3 初始状态对算

IAPCM 提出对算模型的同时,也提供了模型的中子学计算结果。初始状态(零燃耗)下的对算结果列于表 1。这里定义包层中沉积的能量与 1 次聚变释放出的能量(17.6 MeV)之比为能量倍增因子,用 M 表示;定义每次聚变消耗 1 个氚核的同时在产氚包层中生成氚核的个数为氚增殖比,用 TBR 表示;CNPE 表示本工作的计算结果。

IAPCM 计算使用的 Zr 等结构材料的温度为 1 200 K,²³⁵U 和²³⁸U 核素截面库采用的是 15c。由表 1 可看出,结构材料的温度对计算结果影响较小,对算结果的相对偏差均在 1% 范围内。但²³⁵U 和²³⁸U 核素采用 54c 与采用 15c 截面库相比,TBR 差别较大,达 3%。

表 1 初始状态对算结果

Table 1 Comparative results of initial state

计算条件	M	TBR
IAPCM	11.632	1.146
CNPE, 结构材料常温	11.669	1.148
CNPE, 结构材料 800 K	11.694	1.154
CNPE, 结构材料 800 K, U 采用 54c 截面库	11.601	1.114

4 燃耗对算结果

对算模型共分为 6 个燃料层,每个燃料层作为 1 个燃料区,保证燃料区总的热功率为 3 000 MW,燃耗区间的功率分布由蒙特卡罗程序计算得到。计算中,²³⁵U 和²³⁸U 采用 15c 库,锆等结构核素采用自做 800 K 的截面库,其他裂变产物等核素采用 MCNP5 自带截面库。计算过程中对重要活化产物、锕系核素、裂变产物的各种截面均进行了截面替换。

k_{eff} 、 M 和 TBR 的对算结果示于图 2。为达到所需热功率 3 000 MW 的水平,对外中子源强度进行调整,这里未额外给出比较结果。为全面检验程序的正确性,同时分析不同铀水体积比(简称铀水比)对燃耗计算的影响,分别计算了 4 种铀水比下的燃耗过程。不同铀水比

的实现是通过改变冷却剂水层的密度实现的。从图 2 可看出,各种铀水比下,除较高铀水比(较低水密度)下的 TBR 差别稍大外,各燃耗点的堆芯参数符合很好。

除堆芯宏观参数外,对各燃耗区重要核素的成分也进行了详细对算。图 3 示出水密度为 0.6 g/cm³ 情况下,寿期末时,第 1 层燃料及堆芯平均核素成分与 IAPCM 计算结果的相对偏差,其他各层计算结果与此相近。从图 3 可看出,除个别核素(如⁹⁵Mo)外,绝大部分重要核素的相对偏差均在 5%~10% 范围内,符合较好。个别核素成分相对偏差较大可能是由燃耗计算过程中核素截面替换不一致造成的。其他铀水比情况下核素成分的对算结果与此类似。

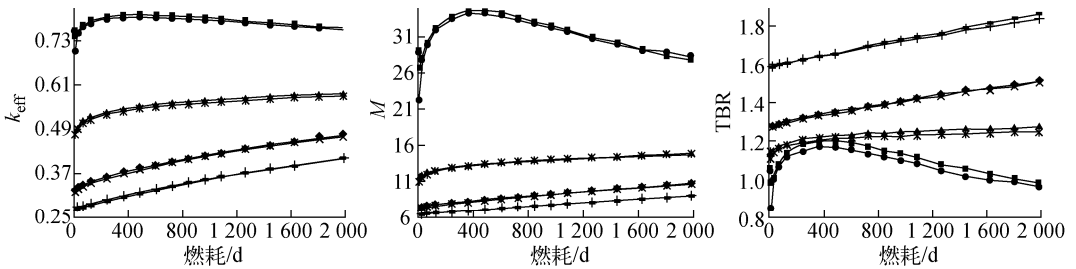


图 2 k_{eff} 、 M 、TBR 的燃耗对算结果

Fig. 2 Comparative results of k_{eff} , M and TBR vs. burnup

水密度, g/cm³: ◆——CNPE, 0.2; ▲——CNPE, 0.6; ■——CNPE, 2.0; +——CNPE, 0.01;
 ×——IAPCM, 0.2; *——IAPCM, 0.6; ●——IAPCM, 2.0; ■——IAPCM, 0.01

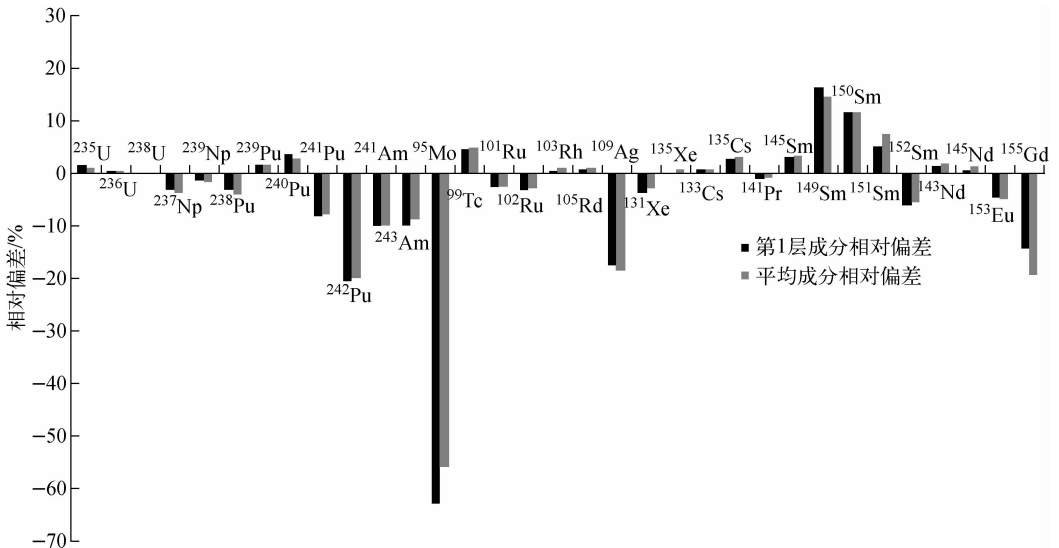


图 3 核素成分的燃耗对算结果

Fig. 3 Comparative results of nuclide component vs. burnup

5 燃耗计算敏感性分析

研究发现,选择不同截面库对燃耗计算结果有一定影响。如 ^{235}U 和 ^{238}U 核素采用54c与采用15c截面库相比,虽总体堆芯参数影响较小,但在寿期末时部分核素(如 ^{239}Pu 、 ^{242}Pu 、 ^{149}Sm 等)相对偏差达5%以上(图4)。由图4还可看出, ^{235}U 的成分变化很小,而 ^{238}U 消耗量的相对偏差在2%以上,从而造成Pu同位素及裂变产物的成分偏差。这说明两种截面库在共振吸收的处理上可能存在一定差别,具体采用哪种截面库可获得更为准确的结果还需详细评价。

另外,由图4还可看出,结构材料如锆、锡、铁等核素选用高温库还是常温库,对计算结果的影响非常小,均在1%以下。另一方面,该图

还能体现出所开发的燃耗耦合程序的稳定性,两次计算中所使用蒙特卡罗程序的统计偏差对最终计算结果的影响很小。

通过对不同水密度下的燃耗计算,可看出铀水比对核素成分的变化有很大影响,寿期末 ^{235}U 和 ^{239}Pu 的成分分别示于图5。从图5可看出,相同燃耗深度下,水密度越小(铀水比越大), ^{235}U 的消耗量越少,而 ^{239}Pu 的含量对应水密度则存在一峰值,总体上,铀水比越大,含量越高。这在中子物理方面是容易理解的,铀水比越小,中子能谱越硬, ^{235}U 的有效裂变截面越大,同时 ^{238}U 俘获吸收增加,从而 ^{239}Pu 含量变大,裂变燃料增殖性能更好。

铀水比的选择不仅与裂变燃料增殖性能相关,还需考虑M和TBR能否满足要求。对算

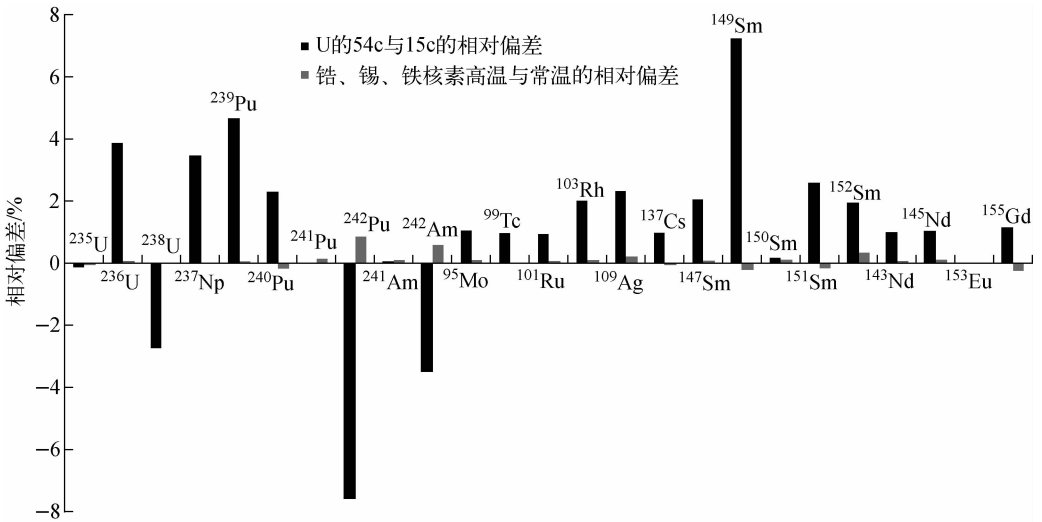


图4 核素截面库的选择对燃耗计算的影响

Fig. 4 Impact of selection of nuclide cross section library on burnup

^{238}U 项为其消耗量的相对偏差,其余为最终含量的相对偏差

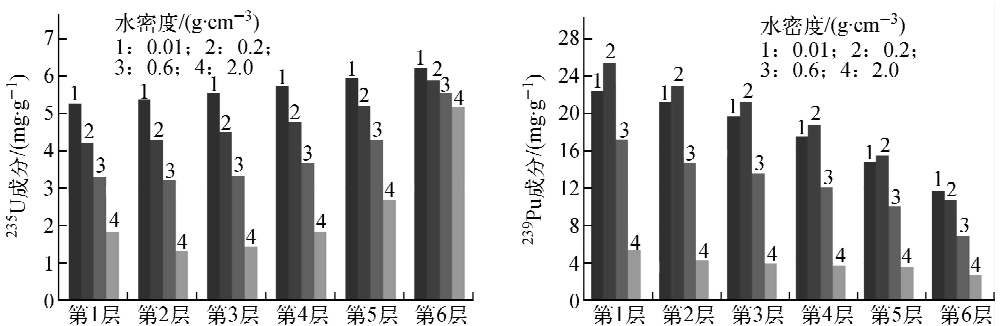


图5 不同水密度对寿期末 ^{235}U 、 ^{239}Pu 成分的影响

Fig. 5 Impact of water density on ^{235}U and ^{239}Pu nuclide components at end-of-life

模型很好地平衡了这两部分因素,使得 M 和 TBR 均能满足要求的同时,有着良好的燃料增殖性能。

6 燃耗计算讨论

与常规燃耗计算情况不同,聚变-裂变混合堆是外中子源驱动的次临界堆芯,堆芯中沉积的能量除裂变能外,还有高能中子(聚变放出的中子能量约为 14.1 MeV)的沉积以及其他放能反应产生的能量等。

点燃耗计算程序中,燃耗计算的输入为比功率或中子注量。另外,蒙特卡罗程序中考虑的每次裂变放出的能量不包括缓发能量,约为 180 MeV,而一般燃耗程序中,该值约为 200 MeV,两者相差 10%。因此,不能直接根据蒙特卡罗程序中的沉积能量与相对中子注量之间的关系给出绝对中子注量供燃耗程序计算,否则计算的燃耗偏深。若通过因子来进行修正,该因子的准确值也不好确定。

因此,在 MOCouple-s 中,采用比功率的方法进行燃耗计算。在堆芯总热功率一定的情况下,对裂变区通过统计裂变沉积能来进行功率分配。

对于堆芯总热功率的定义,一般认为是可用来发电的热功率部分,在本文模型中,认为裂变材料区和冷却水区沉积的能量是可用来发电的,这些区域称作裂变包层,若设计成与一般压水堆相当,就要求裂变包层中的沉积能量为 3 000 MW。由于沉积能量中还包括外源中子及其他放能反应的能量,实际裂变产生的能量小于 3 000 MW,约为 2 800 MW,在每一步燃耗计算中,都可通过蒙特卡罗程序统计出修正因子。

通过上面的分析认为,保证裂变包层总的热功率为 3 000 MW,以裂变材料的裂变能作为比功率进行燃耗计算是最为合理的,符合实际情况。当然,为了与 IAPCM 对算,简单采用裂变功率为 3 000 MW 的情况。必须明确裂变功率与名义热功率之间的关系,保证对算的前提一致,对算结果才有意义。

7 结论

本文对 IAPCM 提出的混合堆球模型进行了详细对算,堆芯总体参数及燃耗寿期末的核素成分符合良好,体现出所使用的程序和核参数库具有较好的一致性。对核参数库的选择、铀水比等对燃耗计算结果的影响进行了详细的敏感性分析,得出一些有意义的结论。对外中子源驱动的次临界堆芯的燃耗计算进行了详细讨论,提出可行的燃耗计算基准。对算结果符合良好,一定程度上证明所开发的燃耗计算程序具备一定的准确性和可靠性,能够适用于混合堆进一步的探究设计工作。

计算过程中出现的一些偏差与燃耗耦合程序中核素的选取方法、裂变产物核素的等价、燃耗深度的定义等有一定关系,还需进行细致的分析。下一步考虑完善蒙特卡罗程序的输运库、制作适用于不同类型次临界能源堆的燃耗库,进一步提高计算精度和计算效率。

参考文献:

- [1] 邵增,程和平,梁志. 聚变-裂变混合堆程序开发及验证[J]. 原子能科学技术,2009,43(增刊): 48-51.
SHAO Zeng, CHENG Heping, LIANG Zhi. The program development and validation for fusion-fission hybrid reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(Suppl.): 48-51(in Chinese).
- [2] DEHART M D, BRADY M C, PARKS C V. OECD/NEA burnup credit calculational criticality benchmark phase I-B results, NEA/NSC/DOC(96)-06(ORNL-6901)[R]. USA: ORNL, 1996.
- [3] 蒋校丰,谢仲生. 蒙卡-燃耗程序系统及 ADS 基准题的计算[J]. 核科学与工程,2003,23(4): 235-331.
JIANG Xiaofeng, XIE Zhongsheng. Monte Carlo-burnup code system and its application to IAEA ADS benchmark[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2003, 23(4): 235-331(in Chinese).