

聚变-裂变混合能源堆球模型参数 敏感性分析

刘国明,程和平,邵增

(中国核电工程有限公司,北京 100840)

摘要:在聚变-裂变混合能源堆球模型基础上,使用蒙特卡罗方法中子学程序对中子源、铀水体积比、产氚区等相关参数进行了中子学的敏感性计算。分析了各参数对混合能源堆能量放大倍数 M 和氚增殖比 TBR 的影响,并总结其基本规律,为开展进一步的混合能源堆概念设计提供了重要参考。

关键词:聚变-裂变混合能源堆;球模型;敏感性分析

中图分类号:TL46 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2012)03-0272-05

Sensitivity Analysis on Parameters of Spherical Model of Fusion-Fission Hybrid Energy Reactor

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

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

Abstract: The sensitivity analysis on neutronics parameters related to neutron source, uranium-water ratio and tritium breeding layers for spherical blanket model of fusion-fission hybrid reactor were presented. By using a Monte-Carlo method based neutron transport code, the effects of the parameters on energy multiplication factor M and tritium breeding ratio TBR were analyzed, and the general various laws of M and TBR were summarized, which were significant for the further conceptual design of fusion-fission hybrid energy reactor.

Key words: fusion-fission hybrid reactor; spherical model; sensitivity analysis

聚变-裂变混合能源堆(简称混合堆)的研发,是以能源供应为主要目的。混合堆是采用聚变中子作为中子源,驱动次临界裂变包层中裂变材料的裂变并产生裂变能的新型核能系统^[1]。文献[2]提出一种以天然铀或压水堆乏燃料的锆合金为裂变燃料,水作冷却剂,硅酸锂

作氚增殖剂的混合能源堆球对算模型。

混合堆球形模型(简称球模型)的基本组成为等离子体区、第一壁、裂变产能区、产氚区及屏蔽层。各区的功能为:等离子体区提供聚变中子源;第一壁提供包层结构支撑及等离子体区辐射热量的载出;裂变产能区用于裂变能量

的生产及排热;产氦区用于产氦及排热。混合堆中,能量放大倍数 M 指包层产出的能量与纯聚变堆芯产生的能量(聚变能量)的比值;氦增殖比 TBR 是指包层产出的氦与聚变消耗的氦的比值^[3]。混合堆的能量放大倍数和氦增殖比是衡量一个方案最重要的两个指标。

混合堆相关材料及几何参数的选择,对各区的功能、 M 和 TBR 均有影响。合理选择混合堆相关材料及几何参数,对混合堆具体方案的设计具有重要意义。为此,本文在混合堆球模型的基础上,使用可靠的蒙特卡罗方法中子学程序,对混合堆的相关材料及几何参数进行敏感性计算,并分析各参数对 M 和 TBR 的影响,旨在开展混合堆进一步的概念设计提供参考。

1 混合堆球模型

1.1 模型描述

图 1 示出聚变-裂变混合堆球模型分层结构。在球体半径为 500 cm 的空腔内,半径 0~495 cm 的球形空腔模拟等离子体区,等离子区外的包层中由里至外分别布置第一壁、裂变产能区、产氦区及屏蔽层。裂变产能区(包括燃料层、水层、Zr 层)和产氦区(包括锂层、水层、Zr 层)内又按材料分成若干层。从第一壁开始到屏蔽层的各层材料、厚度及每种材料的成分参见文献[2]。

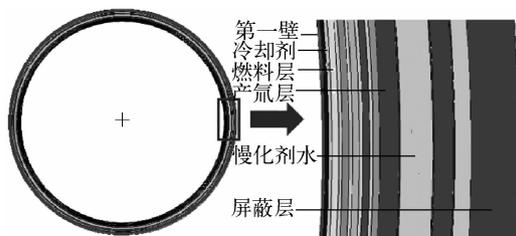


图 1 混合堆球模型结构

Fig. 1 Spherical model of hybrid reactor

1.2 混合堆球模型对算

使用可靠的蒙特卡罗方法中子学程序对混合堆球模型的中子学参数进行计算。文献[2]提供了混合堆球模型的计算结果。为了验证本文程序使用及计算结果的正确性,对提供的球模型进行对算,表 1 列出对算结果。由表 1 可

知,本文对计算参数的选择和程序的使用都是合理的,并与文献[2]结果相符。本文参数敏感性分析中,除了该参数变化外,其他参数均选用对算模型中的值。

表 1 混合堆球模型的对算

Table 1 Comparative calculation of spherical model

计算参数	文献[2]计算结果	本文对算结果
中子源	14.1 MeV 各向同性分布的球形源	同文献[2]
核截面库	自制燃料中 Zr、Sn、Fe 等核素截面库	选用程序自带截面库
能量沉积计数	采用 F6:N,P 统计包层各区的能量沉积	同文献[2]
氦增殖比计数	对产氦层采用 F4 计数	同文献[2]
M	11.632	11.672
TBR	1.146	1.147

2 计算分析

根据混合堆特性,对铀水体积比(简称铀水比)、中子源、包层表面积、包层不封闭面积、裂变层的厚度、产氦层的布置及厚度、产氦层中 ^6Li 的富集度、产氦区 $\text{H}_2\text{O-Li}$ 比、第一壁厚度及屏蔽层厚度等参数进行敏感性计算,分析这些参数对混合堆 M 及 TBR 的影响。

2.1 铀水比

铀水比的选择对于混合堆非常重要。保持裂变区的燃料层和水层的厚度不变,改变水的密度来改变铀水比。分析了铀水比从 0.2 变化到 3.2 时,混合堆 M 和 TBR 的变化(图 2)。从图 2 可知: M 随铀水比的增大先快速增大然后下降,并随铀水比的增大下降的幅度减少;TBR 的变化先快速增加,然后缓慢增加。铀水比变化产生的影响主要是裂变区的能谱变化。当铀水比约为 0.4 时,裂变区达到最佳慢化, M 最大,然而此时能穿透裂变区到达产氦区的高能中子的份额较少,所以 TBR 很小。随着铀水比的增大,能谱逐渐硬化,使得 M 下降而 TBR 上升。当铀水比大于 2.0 时,高能中子的份额增加很少,因而 TBR 的增加量也很少。综合 M 、TBR 以及裂变包层区的传热需要,铀水比取为 2.0 是比较合适的。

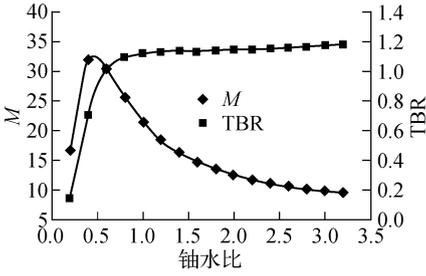


图2 铀水比敏感性分析曲线

Fig. 2 Sensitivity analysis of uranium-water ratio

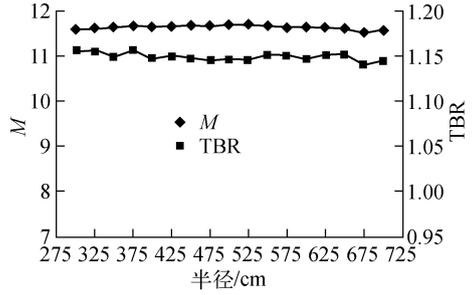


图3 包层表面积敏感性分析曲线

Fig. 3 Sensitivity analysis for surface area of fission layer

2.2 中子源分布

本文分析8种中子源分布,对应表2中的编号顺序,依次为:位于球心的点源,半径为500 mm的球面源,半径为200 cm的球面源,半径为400 cm的球面源,均匀体源,沿半径衰减的体源,内半径为200 cm、外半径为400 cm的球壳源,沿半径衰减的球壳源。从表2可看到,中子源的分布对M和TBR的影响不大。当中子源为位于球心的点源时,M和TBR为最小。其原因是假设中子源的角分布为各向同性,球心点源时,中子源对包层为垂直入射,因而中子的泄漏也是最大。

表2 中子源分布的敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of neutron source

编号	M	TBR	编号	M	TBR
1	11.257	1.133	5	12.010	1.143
2	11.269	1.145	6	11.907	1.147
3	11.479	1.147	7	11.945	1.145
4	12.086	1.148	8	11.920	1.145

2.3 包层表面积

通过改变球壳内半径,并保持包层总体积不变的方法,可改变包层表面积。本文分析了球壳内半径从300 cm变化到700 cm时M和TBR的变化(图3)。由图3可见,包层表面积对M和TBR的影响很小。这是因为外中子源强保持不变,当半径减小时,单位面积上受到的中子源强增大,而当半径增大时,单位面积上的中子源强减少。因此对M和TBR影响不大。

2.4 包层不封闭面积

真实的混合堆中,在偏滤器位置不能布置包层。在混合堆球模型中,通过改变不封闭面

积锥角的大小改变包层的不封闭面积,来模拟真实情况中偏滤器的不封闭面积份额。本文分析了不封闭面积从10%变化到45%时M和TBR的变化情况(图4)。从图4可知,随着不封闭面积比例的增加,M和TBR近似线性减小。

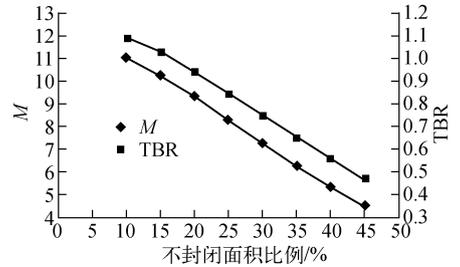


图4 包层不封闭面积敏感性分析曲线

Fig. 4 Sensitivity analysis for uncovered surface of blanket

2.5 裂变区厚度

裂变区由若干燃料层组成。通过增加燃料层数目就可改变裂变包层的厚度。裂变区厚度对M和TBR有直接影响。本文分析了燃料层数从2增加到10的裂变包层厚度的变化。图5示出M和TBR随裂变包层厚度的变化。M随裂变包层厚度的增加而增加,但增加幅度随厚度的增加而下降。TBR随裂变包层厚度的增加而减小。其原因是:随着裂变包层厚度的增加,穿过裂变区达到产氙区的中子数量下降,而中子被裂变区利用的份额相应增加。

2.6 产氙区的布置及厚度

产氙区的布置对混合堆的TBR有重要影响。产氙区中包括若干层锂层和水层。本文先

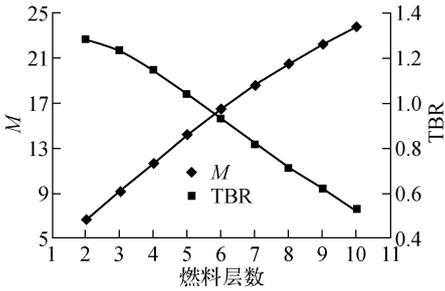


图5 裂变包层厚度敏感性分析曲线

Fig. 5 Sensitivity analysis for thickness of fission layer

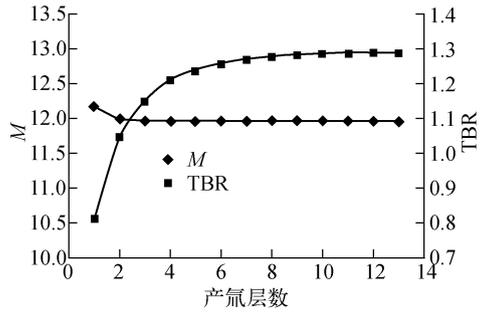


图6 产氚包层厚度敏感性分析曲线

Fig. 6 Sensitivity analysis for thickness of tritium breeding layer

改善了文献[2]模型中产氚区的布置,然后通过增减锂层和水层的层数改变产氚区的厚度。表3列出产氚区改变前后的布置。图6示出产氚区厚度对M和TBR的影响。产氚区中锂的层数从1变化到13时,M基本保持不变,而TBR随着产氚区厚度的增加而上升,但增加幅度不断减小,在产氚区布置了7~8层后,增加幅度已很小。其原因是布置了7~8层锂层后,高能中子穿透前7~8层的锂层到达后面锂层的概率已很小。因此,在实际的混合堆设计方案中,如果TBR不够,一方面可通过适当减小锂层的厚度,另一方面可增加锂层的层数来提高TBR,但布置了7~8层后,对提高TBR的作用已很小。

强,从锂层反射回裂变区的中子减少,相当于裂变区的中子泄漏增强,导致M减小。TBR增大幅度的减少是因为⁶Li对热群中子的吸收截面很大,富集度的增加导致自屏效应增加,因而增大幅度减少。

表3 产氚区的布置

Table 3 Arrangement of tritium breeding layer

模型	产氚区厚度/cm			
	Li ₄ SiO ₄	Zr	H ₂ O	Zr
原模型(2层)	6	0.5	10	0.5
改善后模型(4层)	3	0.3	2	0.3

注:产氚区成分为 Li₄SiO₄/Zr/H₂O/Zr

2.7 锂层中⁶Li富集度

产氚区中锂层的⁶Li富集度对混合堆的TBR有直接影响。本文通过改变锂层中⁶Li富集度分析对混合堆M和TBR的影响。图7示出M和TBR随⁶Li富集度为5%~95%时的变化。由图7可见,M随⁶Li富集度的增大而减少,TBR则随⁶Li富集度的增大而增大,增大幅度和减小幅度均随富集度增加而减小。M减小是因为⁶Li富集度增大,对中子的吸收增

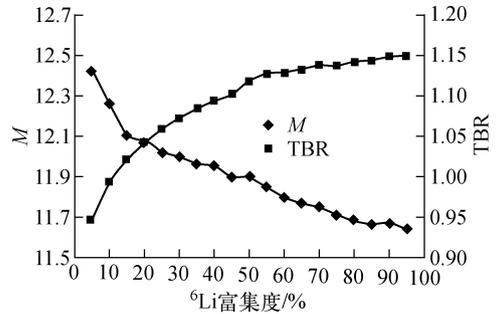


图7 ⁶Li富集度敏感性分析曲线

Fig. 7 Sensitivity analysis of ⁶Li enrichment

2.8 产氚区中H₂O-Li体积比

产氚区中H₂O-Li体积比对混合堆TBR有重要影响。图8示出M和TBR随H₂O-Li体积比的变化。由图8可见:M随H₂O-Li体积比的增大而略微减少,这是因为中子被⁶Li充分吸收,产氚层反射回裂变层的中子减小;TBR则随H₂O-Li体积比的增大,先快速增大,H₂O-Li体积比约为1.0后,则几乎不变。TBR先快速增大后几乎不变的原因是,产氚主要是依靠⁶Li,⁶Li对中子的吸收截面随中子能量的减小而增大,随着水的增多,到达产氚区的快中子被慢化,⁶Li的反应率迅速增加,随着水越来越多,快中子均充分慢化,因而即使水体积继续增加,TBR也几乎不变。

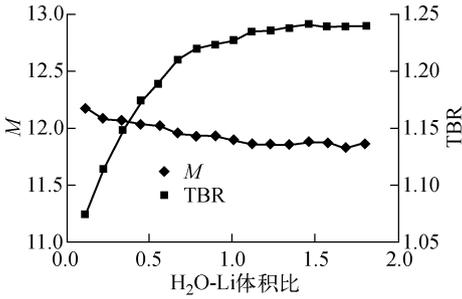
图8 H₂O-Li 体积比敏感性分析曲线

Fig. 8 Sensitivity analysis of water-Li ratio

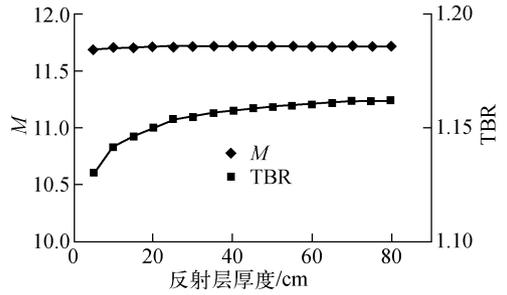


图10 屏蔽层厚度敏感性分析曲线

Fig. 10 Sensitivity analysis for thickness of shield layer

2.9 第一壁厚度

第一壁在混合堆中的作用是提供包层结构支撑及等离子体区辐射热量的载出。减小第一壁厚度会使更多的高能中子进入裂变包层和产氚包层,对 M 和 TBR 有重要影响。图 9 示出 M 和 TBR 随第一壁厚度的变化。由图 9 可知, M 和 TBR 均随第一壁厚度的增加近似线性减小。

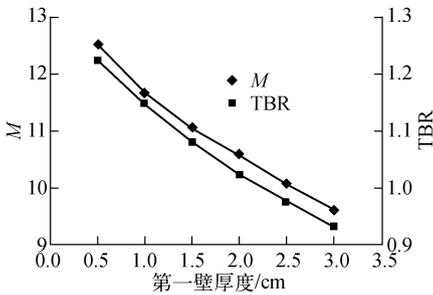


图9 第一壁厚度敏感性分析曲线

Fig. 9 Sensitivity analysis for thickness of the first layer

2.10 屏蔽层厚度

混合堆屏蔽层厚度对 M 和 TBR 也有一定影响。图 10 示出 M 和 TBR 随屏蔽层厚度增加的变化。由图 10 可知, M 随屏蔽层厚度的增加而增加,但增加幅度很小, TBR 随屏蔽层厚度的增加,先较快速增加,后几乎保持不变,但总的增加幅度也不大。这是因为屏蔽层厚度增加,中子泄漏减小,反射回包层的中子增加,这些中子大部分被产氚区吸收,因而对裂变区的影响很小。

3 结论

本文在文献[2]提出的混合堆球模型基础

上,对相关参数展开了详细的敏感性计算,并分析 M 和 TBR 随各参数的变化规律:中子源分布和包层表面积的变化,对 M 和 TBR 影响不大;包层不封闭面积和第一壁厚度的变化均会使 M 和 TBR 近似线性变化;对于混合堆,铀水比选择为 2.0 比较合适, M 随铀水比的增大而减小, TBR 则相应增大;裂变区厚度对 M 影响很明显,随着裂变区厚度的增大, M 迅速增加, TBR 则相应减小;产氚区厚度的增加对 M 影响很小, TBR 则相应增大;产氚区锂层中 ^6Li 富集度的增加,会导致 M 小幅减小, TBR 则相应增大;产氚区中 $\text{H}_2\text{O-Li}$ 体积比的增加,使 M 小幅减小而 TBR 先快速增加后保持不变;屏蔽层厚度对 M 和 TBR 的影响均不大。通过球模型的敏感性分析,得出混合堆 M 和 TBR 变化的基本规律,为下一步混合堆具体方案设计和分析打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 盛光昭,黄锦华. 聚变-裂变混合堆及其在我国核能发展中的作用[J]. 核动力工程,1991,12(6): 12-17.
SHENG Guangzhao, HUANG Jinghua. Fusion-fission hybrid breeder and its function in the development of nuclear power in China[J]. Nuclear Power Engineering, 1991, 12(6): 12-17(in Chinese).
- [2] 师学明. 混合能源堆球对算模型[R]. 北京:北京应用物理与计算数学研究所,2010.
- [3] 师学明. 聚变裂变混合能源堆包层中子学概念研究[D]. 北京:北京应用物理与计算数学研究所,2010.