

聚变-裂变混合堆外中子源效应

徐红, 杨永伟, 周志伟

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:聚变-裂变混合堆(FFHR)作为聚变驱动次临界系统(FDS),具有良好的物理性能,能够实现产能、氚增殖、嬗变核废料等功能。采用 COUPLE 程序研究了水冷混合堆包层的铀水比和中子倍增剂对中子源效率的影响。结果表明:包层能谱越硬,外中子源效率越高;适当加入中子倍增剂 Be 可使外中子源效率增加。研究结果对进一步改进聚变-裂变混合堆的概念设计具有一定的指导意义。

关键词:聚变-裂变混合堆;次临界装置;中子源效率;能量放大;氚增殖

中图分类号:TL328

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)05-0562-05

Efficiency of Neutron Source in Fusion-Fission Hybrid Reactor

XU Hong, YANG Yong-wei, ZHOU Zhi-wei

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a fusion driven subcritical system (FDS), a fusion-fission hybrid reactor (FFHR) is of good characteristics in neutronic physics to fulfill the functional needs for energy generation, tritium breeding and nuclear waste transmutation. The COUPLE code was used to study the effects of the volumetric ratio of uranium to water and the neutron multiplying material in the fission blanket on the efficiency of the fusion neutron source. The results show that the harder the neutron energy spectrum in the fission blanket is, the higher the efficiency of the fusion neutron source is. The results also indicate that adding neutron multiplying material beryllium properly in the blanket is suitable for enhancing the efficiency of external neutron source. The progress achieved in this study has gained some insights of further improving the FFHR conceptual design.

Key words: fusion-fission hybrid reactor; subcritical equipment; neutron source efficiency; energy generation; tritium breeding

聚变-裂变混合堆(FFHR)是依靠托卡马克聚变装置中 D-T 反应产生的单能中子入射到裂变包层内引起裂变燃料裂变而产生能量的装置。D-T 反应表达式为:



(1)

作为外源驱动次临界装置之一的 FFHR 与无源临界堆相比具有明显优势^[1]。首先, FFHR 为次临界堆,固有安全;其次,FFHR 对核燃料的要求非常低,可使用天然丰度核燃料或压水堆乏燃料、贫铀等;此外,FFHR 可用来

嬗变压水堆中产生的长寿命铀系核素(LLMA)和长寿命裂变产物(LLFP)。所有这些优势均由FFHR中聚变装置D-T反应产生的外中子源引起。反应产生的单能中子能量为14.1 MeV,高于2 MeV的裂变中子平均能量,其在包层中的价值也应高于裂变中子。外中子源的引入使包层能谱不同于临界堆的中子能谱,对包层增殖性能产生了一定影响。为定量分析这种差别,本工作采用外中子源效率的概念,通过具体模型分析影响外中子源效率的因素。在保证托卡马克聚变装置结构和等离子体参数完全相同的前提下,分析包层结构和倍增剂对外中子源效率的影响。

1 理论基础

在无外源情况下,中子增殖效果用有效增殖系数 k_{eff} 反映。它满足无源情况下的中子输运方程:

$$A\Phi + D\Phi = \frac{1}{k_{eff}}M\Phi \quad (2)$$

其中: Φ 为中子注量; A 为在次临界包层中由于吸收所引起的中子消耗项; D 为在次临界包层中由于泄漏所引起的中子消耗项; M 为在次临界包层中由于裂变等反应引起的中子产生项。

如果外源存在,则中子输运方程可描述为:

$$A\Phi + D\Phi = M\Phi + S \quad (3)$$

其中: S 为外中子源项。

在有外源条件下,裂变包层的有效增殖系数为裂变产生项 $M\Phi$ 和消耗项 $A\Phi + D\Phi$ 的比值,即:

$$k_s = \frac{\langle M\Phi \rangle}{\langle A\Phi \rangle + \langle D\Phi \rangle} = \frac{\langle M\Phi \rangle}{\langle M\Phi \rangle + \langle S \rangle} \quad (4)$$

其中:符号 $\langle \rangle$ 表示对变量在整个定义域内积分。

记外源中子平均值为 $\bar{\Phi}_s^*$, 裂变中子平均值为 $\bar{\Phi}_f^*$, 源效率 φ^* 定义为外中子源平均值和裂变中子源平均值的比值^[2-3], 通过简单推导可得:

$$\varphi^* = \frac{\bar{\Phi}_s^*}{\bar{\Phi}_f^*} = \left(\frac{1}{k_{eff}} - 1 \right) / \left(\frac{1}{k_s} - 1 \right) \quad (5)$$

进一步分析,次临界堆中1个外源中子产生的裂变能 E_s 为:

$$E_s = \bar{E}_0 / \left[\bar{\nu} \cdot \left(\frac{1}{k_s} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

其中: $\bar{\nu}$ 为1次裂变放出的平均中子数,一般取为2.4; \bar{E}_0 为1次裂变释放能量,约200 MeV。

而次临界堆在无外源情况下,1个中子产生的裂变能 E_f 为:

$$E_f = \bar{E}_0 / \left[\bar{\nu} \cdot \left(\frac{1}{k_{eff}} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)可得:

$$\varphi^* = \frac{E_s}{E_f} \quad (8)$$

由式(8)可知, φ^* 同样可看作有外源情况下1个外中子诱发产生的次临界堆的裂变能和无外中子源情况下进行临界计算1个中子所产生的裂变能的比值。

2 模型介绍

2.1 混合堆整体模型

本工作主要研究混合堆聚变中子源效率,为研究方便,在反映整体框架前提下力求选择简单模型结构。聚变-裂变混合堆整体结构如图1所示,选择横截面为D形的模型作为研究对象,整个混合堆结构近似成轮胎状,环向采用均匀化处理。D形内部即为等离子体。等离子体大半径 R 为510 cm,小半径 a 为154.5 cm,分支点 b 为286 cm,即环径比 $A=R/a=3.30$,分支点处拉长比 $k=b/a=1.85$ 。

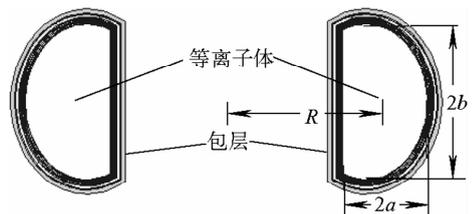


图1 聚变-裂变混合堆整体结构图
Fig.1 Structure model of FFHR

2.2 包层模型

包层分为第1壁、燃料区、氦增殖区和反射层4个主要区域。为便于比较研究,燃料区选择4种不同铀水比结构(图2)作为计算模型,分别为模型1、模型2、模型3和模型4。图2中右边括号内的数字比反映的是包层燃料区中燃料板厚度和冷却剂厚度的比值。表1列出各模型的材料和尺寸。

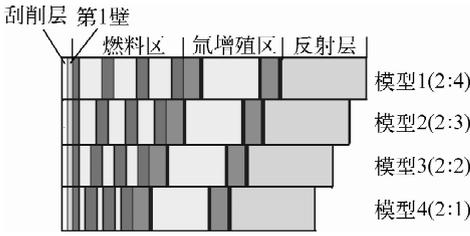


图2 不同模型包层结构

Fig. 2 Different blanket models

表1 混合堆包层各区材料和尺寸

Table 1 Blanket material and size

区域	材料	作用	厚度/cm
刮削层	无		1
第1壁	铁	第1壁	1
燃料区	铀钚合金	燃料	1
	轻水	慢化冷却	0.5~4.0
	铀钚合金	燃料	2
	轻水	慢化冷却	0.5~4.0
	铀钚合金	燃料	2
	轻水	慢化冷却	0.5~4.0
	铀钚合金	燃料	2
	轻水	慢化冷却	0.5~4.0
氙增殖区	硅酸锂	产氙	3
	锆	包壳	0.5
	轻水	慢化	10
	锆	包壳	0.5
	硅酸锂	产氙	3
	锆	包壳	0.5
反射层	铁	反射层	15

注:忽略0.1 cm厚锆包壳

3 计算与分析

在相同等离子体结构参数条件下研究包层结构和 neutron 倍增剂对 φ^* 的影响。主要讨论 φ^* 和混合堆基本参数,包括 k_{eff} 、产氙率 TBR、能量放大倍数 M_E 。采用三维燃耗程序 COUPLE^[4-5] 进行计算分析。

3.1 包层结构对源效率的影响

对图2中的模型1~4通过改变包层中铀水比来改变包层结构,同时也改变了包层中快热中子的比例,即改变了能谱。

不同包层结构 k_{eff} 、TBR、 M_E 和 φ^* 的比较

示于图3。由图3可得到以下结果。

1) k_{eff} 在燃耗初期较小,但随燃耗增加,300 d后基本稳定。相同燃耗点下,铀水比越小, k_{eff} 越大。

2) 铀水比对 TBR 有一定影响,4个模型均能满足 TBR 大于1的要求。

3) M_E 随燃耗的变化与 k_{eff} 类似。相同燃耗点下,铀水比越小,包层中子慢化越充分,能谱越软,裂变增多(表2), M_E 越大。

4) φ^* 随燃耗变化有一定的震荡,这与该燃耗点下包层具体物理特性相关,但总体趋势随燃耗减小,这是因为裂变产物对热中子的吸收使裂变减少,外中子源价值下降;相同燃耗点下,铀水比越大,包层能谱越硬,发生(n,2n)和(n,3n)等反应的可能性越大(表2),这就实现了中子倍增,使 φ^* 增大。

5) 所有模型的 φ^* 均在1.6以上,说明14.1 MeV的外源中子价值是裂变中子(平均能量2 MeV)价值的1.6倍以上,这就是混合堆具有很好物理性能的原因;ADS外中子源效率大致在0.9~1.8之间^[6-7](随靶件半径变小而增大),说明FDS中子源比ADS中子源更有优势。

6) 包层结构对 φ^* 影响较大,模型1和模型4相差0.8左右。

图4示出4种模型包层的能谱。能谱越软对 M_E 增大越有益;能谱越硬对 φ^* 的提高越有益。这说明,混合堆中, M_E 和 φ^* 并无直接关系。在本工作的设计中,它们不但不成正比,反而往相反方向变化。所以,在包层设计中,需根据具体要求选择合适的铀水比,使 φ^* 和 M_E 有所平衡。

3.2 中子倍增剂对 φ^* 的影响

Be 因具有较大的(n,2n)反应截面而被选作中子倍增剂,在聚变堆中得到广泛使用。在FFHR包层中,同样可考虑布置Be,以达到中子倍增的效果。由于Be发生(n,2n)反应有一定的阈值(1.86 MeV),只有在能谱较硬时才能发生反应,所以,本工作采用加入中子倍增剂的模型仅是在上述模型1的基础上,紧贴第1壁后面加入2 cm厚的Be层,而保持其他结构尺寸完全不变,仅作2 cm的外推。

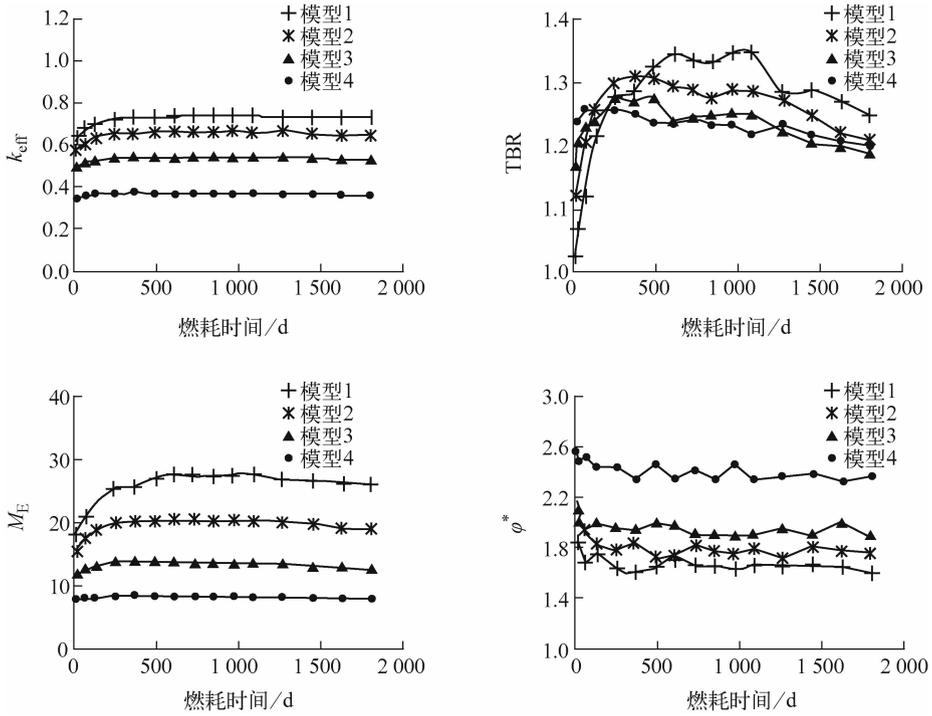


图 3 不同包层结构 k_{eff} 、TBR、 M_E 和 ϕ^* 比较

Fig. 3 Comparison of k_{eff} , TBR, M_E and ϕ^* of different blankets

表 2 不同模型发生 (n, xn) 、 (n, f) 的反应几率

Table 2 Probability of (n, xn) , (n, f) reaction for different models

模型	反应几率 ¹⁾	
	(n, xn)	(n, f)
1	0.309	1.303
2	0.328	1.127
3	0.349	0.867
4	0.369	0.562

注:1) 归一到1个源中子

计算结果如图 5 所示。包层中加入中子倍增剂使得 M_E 增加了 2~4, ϕ^* 总体上也有所提高, 设置倍增剂的包层, ϕ^* 一般会提高 0.03~0.15。这是因为包层中加入的 Be 发生 $(n, 2n)$ 或 $(n, 3n)$ 反应。表 3 列出中子倍增剂对 (n, xn) 、 (n, f) 反应几率的影响。从表 3 可见, 中子倍增剂的加入使得 (n, xn) 和 (n, f) 反应几率均有所增加, 尤其是 (n, xn) 反应使得中子倍增, 使源中子价值增加。因此, 在包层设计中,

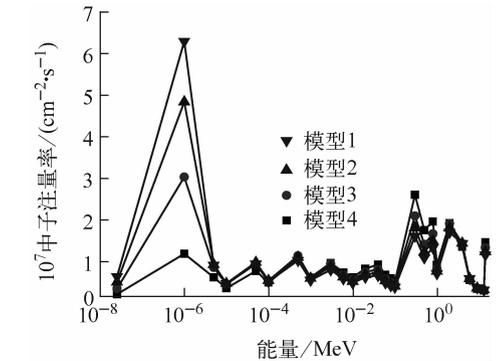


图 4 包层能谱

Fig. 4 Blanket spectra
中子注量率归一到1个中子

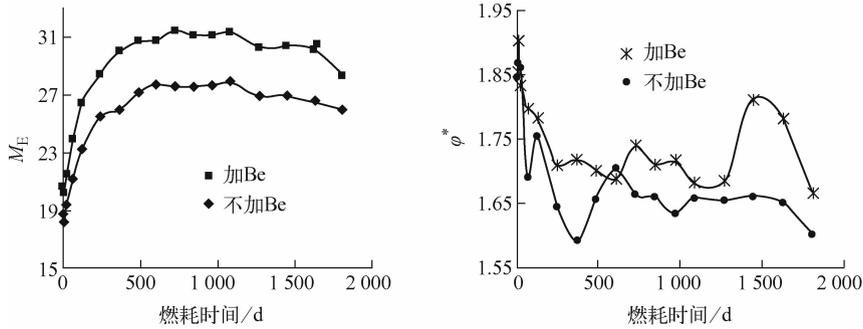
可考虑适当加入 Be, 以提高中子 ϕ^* 和 M_E 。

表 3 中子倍增剂对 (n, xn) 、 (n, f) 反应几率的影响

Table 3 Impact of neutron multiplying material to (n, xn) , (n, f) reaction

反应	反应几率 ¹⁾	
	无中子倍增剂	Be 中子倍增剂
(n, xn)	0.309	0.509
(n, f)	1.303	1.442

注:1) 归一到1个源中子

图5 中子倍增剂对 M_E 和 φ^* 的影响Fig. 5 Impact of neutron multiplying material to M_E and φ^*

4 结论

通过 FFHR 包层模型对影响混合堆外中子源效率的几个因素进行了讨论,包括包层结构和中子倍增剂的影响,得出如下初步结论:

1) D-T 中子源效率在 1.6 以上,说明 1 个 D-T 外源中子的贡献大于 1.6 个裂变中子的贡献;

2) 包层结构对源效率影响较大,铀水比大,能谱硬,源效率高,但 M_E 较小,反之亦然,这说明 M_E 和外中子源效率关联度不大,在包层设计中要综合考虑两方面的因素;

3) 加入中子倍增剂可使外中子源效率和包层 M_E 均有所提高,所以,在包层中加入适当的 Be 会改善包层物理性能;

4) ADS 产生的中子的源效率低于 FDS 中 D-T 聚变中子源效率,表明聚变驱动次临界堆作为产能装置更具优越性。

研究结果和分析结论对 FFHR 概念设计有一定指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] 赵仁恺,阮可强,石定寰. 八六三计划能源技术领域研究工作进展(1986—2000)[M]. 北京:原子能出版社,2001:211.
- [2] 马爱锋,蒋校丰,张少泓. 由中子注量率空间分布形状测量确定反应堆次临界度的方法研究[J]. 核科学与工程,2007,27(4):306-309.

MA Aifeng, JIANG Xiaofeng, ZHANG Shao-

hong. Study on the method of determining the sub-criticality of a reactor via the measurement of core neutron flux spatial distribution[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(4): 306-309(in Chinese).

- [3] 蒋校丰,谢仲生. 加速器驱动快-热包层耦合次临界系统的性能研究[J]. 核动力工程,2007,28(1):13-16.

JIANG Xiaofeng, XIE Zhongsheng. Research on capability of accelerator driven coupled fast/thermal spectrum system[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(1): 13-16(in Chinese).

- [4] 李浩泉. 加速器驱动系统的中子物理学分析[D]. 北京:清华大学,2003.

- [5] 韩高,杨永伟. 加速器驱动的次临界系统快堆次铜系核素非均匀布置堆芯的中子学研究[J]. 原子能科学技术,2006,40(6):718-722.

HAN Song, YANG Yongwei. Neutronics study on minor actinide heterogeneous core of ADS fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(6): 718-722(in Chinese).

- [6] SELTBORG P. Definition and application of proton source efficiency in accelerator-driven systems [J]. Nuclear Science and Engineering, 2003, 145(3): 390-399.

- [7] SELTBORG P. Proton source efficiency for heterogeneous distribution of actinides in the core of an accelerator-driven system[J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 154(2): 202-214.