

CFETR 固态水冷包层增殖材料 对 TBR 与核热沉积影响的初步分析

田英男¹, 陈义学¹, 马续波¹, 刘松林²

(1. 华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206;
2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:中国聚变工程实验堆(CFETR)是正在设计的聚变反应堆。利用蒙特卡罗粒子输运模拟程序MCNP,针对初步设计的以正硅酸锂(Li_4SiO_4)和钛酸锂(Li_2TiO_3)为增殖材料的两种固态水冷包层中子学特性进行了计算和分析。通过对不同模型包层氘增殖比、中子壁负载和核热沉积的计算结果的对比分析可知,包层材料和其设计是影响包层中子学性能的主要因素之一。

关键词:中国聚变工程实验堆;固态水冷包层;中子学性能分析

中图分类号:TL64 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2013)S1-0619-06

doi:10.7538/yzk.2013.47.S1.0619

Preliminary Analysis of Breeder Materials Impact on TBR and Nuclear Heating for Water Cooling Solid Breeder Blanket of CFETR

TIAN Ying-nan¹, CHEN Yi-xue¹, MA Xu-bo¹, LIU Song-lin²

(1. School of Nuclear Science and Engineering,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: China Fusion Engineering Testing Reactor (CFETR) is China's fusion reactor being designed. The three-dimensional Monte Carlo neutron-photon transport code MCNP was used in the neutronics performance calculations for water cooling solid breeder blanket (WCSB) of CFETR which use the Li_4SiO_4 and Li_2TiO_3 as its breeder material. By comparative analysis of the tritium breeder ratio, neutron wall loading and nuclear heat calculation results of the different models, the results show the main factors which influence the neutronics performance of blanket are the blanket breeder material and its design.

Key words: China Fusion Engineering Testing Reactor; water cooling solid breeder blanket; neutronics performance analysis

收稿日期:2013-10-29; **修回日期:**2013-11-22

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0631);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12ZX13);国家磁约束核聚变能研究专项支持项目资助(2013GB108004);国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项资助项目(2014GB119000)

作者简介:田英男(1987—),男,北京人,硕士研究生,核科学与工程专业

中国聚变工程实验堆(CFETR)是中国正在设计的聚变反应堆。增殖包层是CFETR最重要组成部分之一,它有3个重要作用:1)在聚变堆运行时可通过内部增殖材料与中子反应生成氦,实现氦的自持;2)把反应堆运行时中子、等离子体照射产生和内部沉积的能量转化成可供生产利用的热能;3)屏蔽高能中子和等离子体的辐射,防止包层结构材料辐照损伤和保证运行人员的辐照安全。

本工作对CFETR水冷固态包层(WCSB)两种增殖材料对氦增殖比、中子壁负载和核热沉积等中子学特性影响进行初步计算分析。

1 CFETR 及其 WCSB 三维 MCNP 计算模型

使用蒙特卡罗程序 MCNP^[1] 建立不同的模型并计算各模型包层的中子学特性,计算使用的数据库采用 IAEA 发布的聚变评价核数据库 FENDL/2^[2]。

由于 CFETR 结构本身具有对称性,取其

1/16(环向 22.5°)作为计算模型。它的等离子体大半径为 5.7 m,等离子体小半径为 1.6 m,拉长比为 1.8。CFETR 的聚变功率为 200 MW。CFETR 三维 MCNP 模型如图 1 所示。

CFETR 按两种增殖材料设计出两种结构相同的包层模块,分别是 a 型包层模块(模型 a)和 b 型包层模块(模型 b),包层模块如图 1b 所示。a 型 WCSB 模块内各材料区沿径向交错分布,由 5 个氦增殖区和 5 个中子倍增区组成,各增殖区和倍增区之间由冷却板隔离,共 10 块冷却板,增殖区厚度为 40 cm。内包层模块内各材料区沿径向交错分布,由 5 个氦增殖区、4 个中子倍增区组成,各增殖区和倍增区之间由冷却板隔离,共 9 块冷却板,增殖区厚度为 60 cm。增殖区材料为 Li_4SiO_4 ,其中 ^6Li 的丰度为 80%,占空比为 0.65。倍增区材料为 Be,Be 球占空比为 0.8。b 型 WCSB 模块增殖材料为 Li_2TiO_3 , ^6Li 的丰度为 80%,外包层第 1 增殖区厚度由 1 cm 增加到 2 cm,第 5 增殖区厚度由 2 cm 减少到 1 cm。表 1、2 列出 a 型内、外包层材料及尺寸。

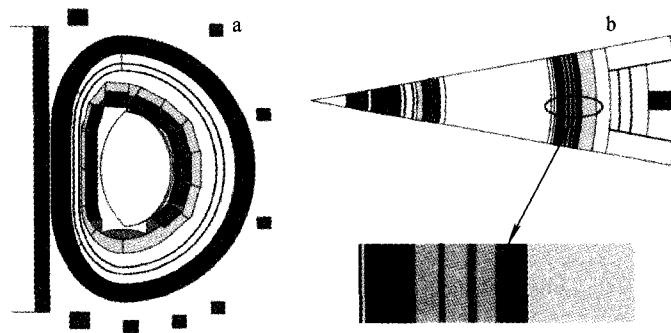


图 1 CFETR 径向-极向(a)、径向-环向(b)模型剖面图

Fig.1 Radial-poloidal (a) and radial-ring (b) model cross-section of CFETR

表 1 内包层材料及尺寸

Table 1 Material composition and size of inboard blanket module

区域编号	区域名称	材料	尺寸/cm
1	包层护甲	Be 板	1
2	第一壁	水蒸气(41.558%)+Eurofer 钢(58.442%)	1.4
3	增殖区 1	Li_4SiO_4	0.5
4	隔板 1	水蒸气(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
5	倍增区 1	Be 块	5
6	隔板 2	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
7	增殖区 2	Li_4SiO_4	1

续表 1

区域编号	区域名称	材料	尺寸/cm
8	隔板 3	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
9	倍增区 2	Be 球块	6
10	隔板 4	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
11	增殖区 3	Li ₄ SiO ₄	1
12	隔板 5	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
13	倍增区 3	Be 球块	7
14	隔板 6	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
15	增殖区 4	Li ₄ SiO ₄	1
16	隔板 7	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
17	倍增区 4	Be 球块	6
18	隔板 8	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
19	增殖区 5	Li ₄ SiO ₄	2
20	隔板 9	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
21	石墨反射层	石墨	10
22	间隙		1
23	屏蔽层	Eurofer 钢	15

表 2 外包层材料及尺寸

Table 2 Material composition and size of outboard blanket module

区域编号	区域名称	材料	尺寸/cm
1	包层护甲	Be 板	1
2	第一壁	水蒸气(41.558%)+Eurofer 钢(58.442%)	1.4
3	倍增区 1	Be 块	6.4
4	隔板 1	水蒸气(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
5	增殖区 1	Li ₄ SiO ₄	1
6	隔板 2	水蒸气(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
7	倍增区 2	Be 块	10
8	隔板 3	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
9	增殖区 2	Li ₄ SiO ₄	1
10	隔板 4	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
11	倍增区 3	Be 球块	10
12	隔板 5	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
13	增殖区 3	Li ₄ SiO ₄	1
14	隔板 6	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
15	倍增区 4	Be 球块	10
16	隔板 7	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
17	增殖区 4	Li ₄ SiO ₄	1
18	隔板 8	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
19	倍增区 5	Be 球块	8.5
20	隔板 9	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
21	增殖区 5	Li ₄ SiO ₄	2
22	隔板 10	水(39.68%)+Eurofer 钢(60.32%)	0.9
23	石墨反射层	石墨	15
24	间隙		1
25	屏蔽层	Eurofer 钢	45.7

CFETR WCSB 中子学性能分析分别针对两种增殖材料包层三维 MCNP 模型进行。表 3 列出各包层模型的设置,两种模型包层模块厚度和结构材料相同。

表 3 不同包层模型设置

Table 3 Blanket setting of different models

包层模型	模型形状	源区设置	增殖区材料
a	22.5° D 环	单分布源区	Li_4SiO_4
b	22.5° D 环	单分布源区	Li_2TiO_3

单分布源区^[3]是指源区内源密度均匀分布,即 MCNP 计算时在同一源区内同概率抽样。包层模型 a 与 b 结构相同,图 2 示出包层模型 a、b 包层模块的编号。根据上述三维计算模型,本工作完成了包层的中子学性能计算分析。MCNP 计算中跟踪了 50 万粒子,使其统计误差控制在 2% 以下,保证了计算精度。

2 中子学计算结果与分析

2.1 氦增殖比

为维持聚变堆运行,达到聚变堆氦自持,三

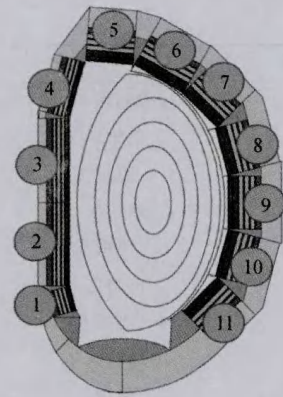


图 2 模型包层模块的编号

Fig. 2 Number of model blanket module

维模型要求氦增殖比(TBR)大于 1.20,即 $\text{TBR} > 1.20$ 。包层模型 a、b 的 TBR 分别为 1.338 和 1.311,满足 CFETR 设计要求。图 3 示出模型 a、b 的各包层模块对 TBR 的贡献。

图 4 示出模型 a、b 9 号包层模块各增殖区 TBR 分布。由图 4 可见,第 1 增殖区贡献的 TBR 占整个增殖区的约 60%,第 1 增殖区设计会直接影响到 TBR 是否能达到设计要求。

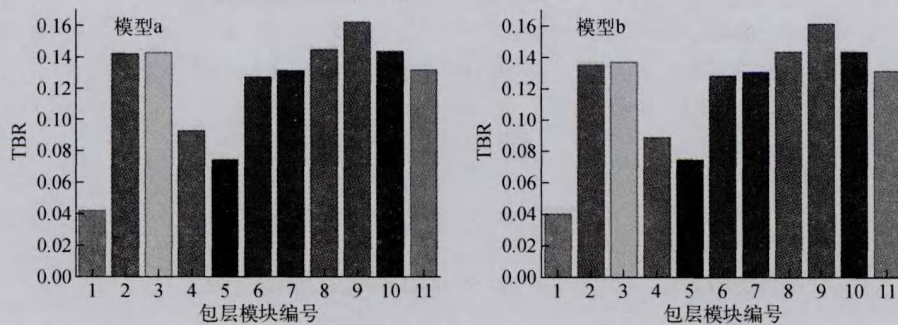


图 3 各模型包层模块的 TBR 贡献

Fig. 3 TBR of different blanket modules

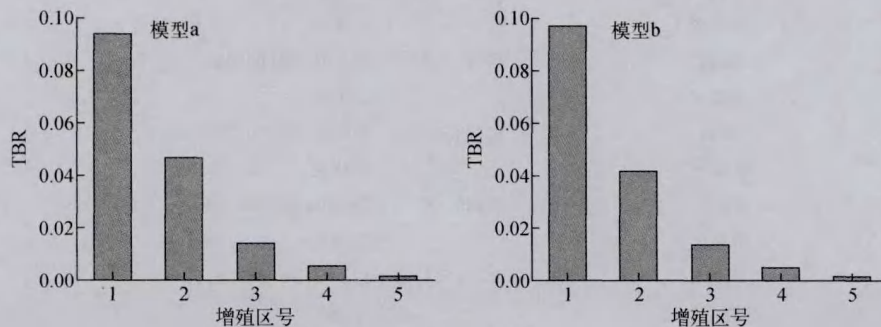


图 4 模型 a、b 9 号包层模块的 TBR

Fig. 4 TBR of 9th blanket module for model a and b

2.2 中子壁负载

中子壁负载(NWL)是衡量中子照射在包层表面第一壁单位面积上中子带来的能量冲击的指标。要保证包层内部结构和材料的辐照安全就需有效控制中子壁负载。表 4 列出不同模块的中子壁负载沿环向的分布。包层模块第一壁的平均中子壁负载为 0.367 MW/m²,最大值出现在赤道层的 9 号模块上,为 0.420 MW/m²,最小值出现在 4 号模块上,为 0.246 MW/m²。

表 4 模型的中子壁负载

Table 4 Neutron wall loading of model

包层模块编号	NWL/(MW · m ⁻²)
1	0.271
2	0.311
3	0.312
4	0.246
5	0.311
6	0.387
7	0.403
8	0.417
9	0.420
10	0.412
11	0.417

2.3 核热沉积

核热沉积是聚变堆运行时等离子体产生的

中子能量沉积与 γ 诱发的能量沉积的总和^[4]。使用 MCNP 计算了两个模型中各包层模块的核热沉积,结果列于表 5。

表 5 不同模型的核热沉积

Table 5 Nuclear heating of different models

包层模块编号	核热沉积/(W · cm ⁻³)	
	模型 a	模型 b
1	0.723	0.773
2	0.780	0.792
3	0.793	0.802
4	0.679	0.747
5	0.470	0.526
6	0.553	0.616
7	0.574	0.531
8	0.580	0.519
9	0.582	0.509
10	0.570	0.514
11	0.577	0.530

图 5 示出模型 a、b 的 9 号包层模块在不同材料区核热沉积随径向的分布。由图 5 可见,前两个增殖材料区的核热沉积是冷却板和倍增区的数倍。由图 4 可知,前两个增殖材料区为 TBR 主要贡献区,每次 ${}^6\text{Li}(n, T){}^4\text{He}$ 反应释放 4.78 MeV 能量^[5],导致前两个增殖材料区的核热沉积较高。

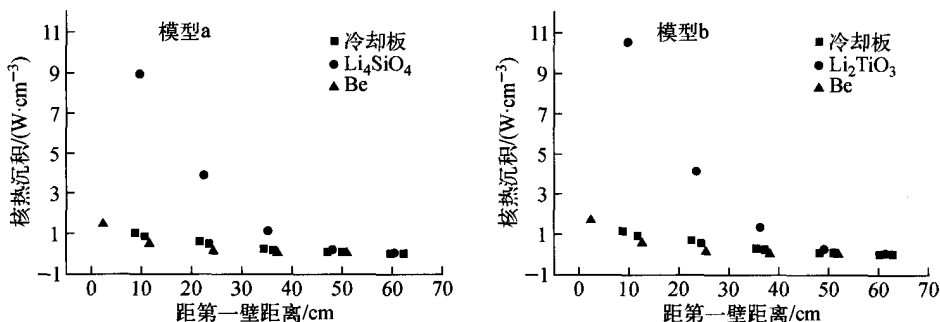


图 5 9 号包层模块内核热沉积分布

Fig. 5 Nuclear heating of 9th blanket module

图 6 示出模型 a 和 b 的 9 号包层模块增殖区的核热沉积分布。由图 6 可见,当增殖区采用 Li₂TiO₃ 为增殖材料时,为保证 TBR

满足设计要求,第 1 增殖区厚度增加 1 倍,与增殖材料采用 Li₄SiO₄ 相比其核热沉积增加了 17.56%。

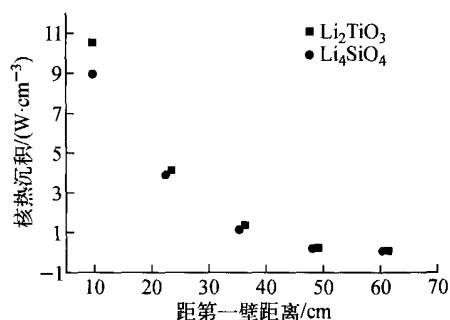


图6 9号包层模块内增殖区核热沉积分布

Fig. 6 Nuclear heating of breeder zone in 9th blanket module

3 小结

模型 a、b 中 $TBR > 1.20$, 满足设计要求。由于增殖材料 Li_4SiO_4 比 Li_2TiO_3 含锂量高, 且前两个增殖区的 TBR 贡献占增殖区总 TBR 的 85%, 所以要达到相同的 TBR 设计要求, 采用 Li_2TiO_3 作为增殖材料时需增加第 1 增殖区厚度。

由于两个模型整体包层几何相同, 各包层第一壁的中子壁负载相同。包层模块第一壁的平均中子壁负载和极值均控制在合理范围内, 符合设计要求。

随着增殖区厚度的增加, 造成整个包层模块核热沉积增加约 20%。由计算结果可知, 包层模块增殖材料选取和包层内部设计影响包层核热沉积的大小和分布。因此, 合理设计包层

模块增殖材料的分布对热工水力计算及冷却系统设计有重大影响。

参考文献:

- [1] MCNP/4C; Monte Carlo N -particle transport code, CCC-700[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [2] IAEA nuclear data section, FENDL-2.0 fusion evaluated nuclear data library, IAEA-NDS-CD6, version 14[R]. Vienna: IAEA, 1999.
- [3] CHEN Y, WU Y. Effect of fusion neutron source numerical models on neutron wall loading in a D-D Tokamak device[J]. Plasma Sci Technol, 2003, 15(2): 1 749-1 754.
- [4] 韩静茹, 陈义学, 陆道纲, 等. 中国氦冷固态实验包层 2×6 模块中子学计算分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(4): 453-456.
HAN Jingru, CHEN Yixue, LU Daogang, et al. Chinese helium cooled solid test blanket 2×6 modules neutronics calculation and analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(4): 453-456(in Chinese).
- [5] 陈晓军, 王和义, 罗阳明, 等. CH HCSB TBM 中固体氟陶瓷增殖剂微球研究进展[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 26(3): 210-216.
CHEN Xiaojun, WANG Heyi, LUO Yangming, et al. Ceramic breeder pebbles for CH HCSB test blanket module[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2009, 26(3): 210-216(in Chinese).