

# 聚变堆混和球床包层 中子学和热工水力特性研究

贾小波<sup>1</sup>, 杨永伟<sup>1</sup>, 周志伟<sup>1</sup>, 经荣清<sup>1</sup>, 冯开明<sup>2</sup>

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;

2. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**在聚变堆初步概念设计的基础上, 针对固态包层设计路线, 提出了一个先进的氦冷固态包层概念。设计采用  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  陶瓷小球混和球床, 物理和化学相容性好; 采用  $\text{SiC}$  作为结构材料, 提高耐高温性能及氦气出口温度。计算结果表明: 选择  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比在 2 和 4 之间较合理; 在  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比为 3 时,  $^6\text{Li}$  富集度取 30%~80% 较适宜; 球床的最高温度低于材料的温度限值, 温度分布合理均匀。该方案可较大程度提高热效率和改善中子学以及氚增殖性能。

**关键词:**聚变堆; 氦冷固态包层; 混和球床; 氚增殖率

中图分类号: TL33

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)05-0565-05

## Study on Neutronics and Thermo-hydraulics for Mixed Pebble Bed Blanket of Fusion Reactor

JIA Xiao-bo<sup>1</sup>, YANG Yong-wei<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-wei<sup>1</sup>, JING Xing-qing<sup>1</sup>, FENG Kai-ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the preliminary design of fusion reactor, aiming at the outline of solid blanket design, an advanced helium cooled solid blanket concept was developed.  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  mixed pebble bed as neutron and tritium breeder which has high compatibility was adopted, and  $\text{SiC}$  as structure material which can endure high temperature for increasing the temperature of helium outlet. Calculation results show that the volume ratio of  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  should properly approximate between 2 and 4. In case of selecting 3 as volume ratio of  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $^6\text{Li}$  enrichment ranged between 30% and 80% is suitable. The maximum temperature in the pebble bed is below the limited temperature of blanket material, and temperature distribution is reasonable properly uniform. This scheme can improve the thermal efficiency as well as neutronics and tritium breeding performance.

**Key words:** fusion reactor; helium cooled solid blanket; mixed pebble bed; tritium breeding ratio

包层是聚变堆的重要构件,包层材料的选择要充分考虑技术可行性,使聚变能源在安全性、经济性和环境影响方面具有吸引力<sup>[1]</sup>。固态包层具有安全性好、基础数据相对成熟、材料腐蚀小、无磁流体力学(MHD)效应等优点,是一种最有可能实现的包层概念。聚变堆陶瓷固态包层设计采用模块结构,以利于通过赤道水平窗口进行安装和拆卸,并提高包层的安全性<sup>[2]</sup>。

## 1 聚变堆固态包层概念设计

聚变堆的堆内主要构件示于图 1,其包层的功能为产氦、产热以及屏蔽。包层主要分为固态陶瓷包层和液态金属包层,液态包层利用 Li 的液态合金作为氦增殖剂,无需中子倍增或以 Pb 作为中子倍增剂。固态包层利用 Li 的陶瓷作为氦增殖剂,Be 合金作为中子倍增剂。

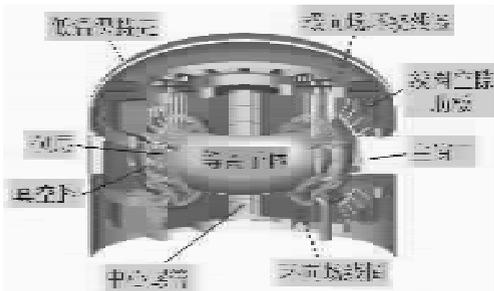


图 1 聚变堆模型

Fig. 1 Fusion reactor model

聚变堆固态包层采用  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ 、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  混和球床<sup>[3]</sup>,以改善氦增殖能力,其中, $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  作为中子倍增剂, $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  作为氦增殖剂。 $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  相对铍金属而言,具有较低的辐照损伤、容易制造、具有耐高温性等优点<sup>[3]</sup>。 $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  的物理和化学高温相容性良好<sup>[5]</sup>。

采用 SiC 或 ZrC 作为结构材料,以提高中子学性能,同时改善耐高温性能,最高可承受  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  的温度,可提高氦气出口温度,大幅提高热效率<sup>[6]</sup>。第一壁冷却管为 U 型管板,入口和出口交错排列,均匀化传热,降低热应力。包层模块示于图 2。

在包层内部,对增殖区的冷却采用冷却

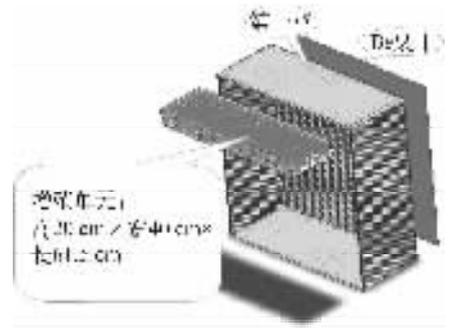


图 2 包层模块

Fig. 2 Blanket module

管<sup>[7]</sup>,使用两种位置尺寸的管道,交错排列。这样,可提高单管移出热效率、降低结构材料的体积。聚变堆包层冷却管道采用单一直径的管道,因分支管道内氦气前冲,分支的管道流量难以控制,热工安全性能差,优化选用单一直径通道管道易制造,且不考虑流量分配;同时,两种不同位置尺寸的管道单管行程降低一半,有效减少压降。增殖单元结构示于图 3。

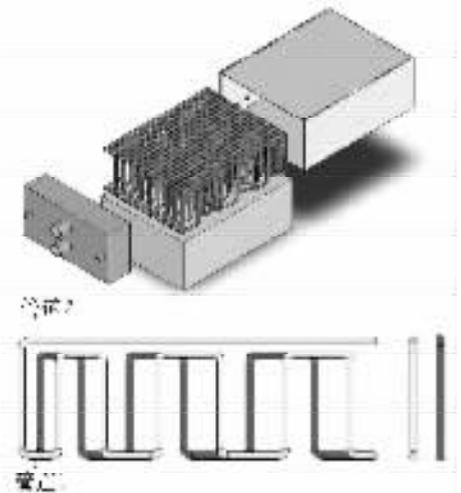


图 3 增殖单元

Fig. 3 Breeder unit

## 2 包层中子学分析

聚变堆采用的包层材料列于表 1。

### 2.1 几种材料组合的比较

为对各种材料组合的包层进行比较,表 2 列出了几种包层方案。计算条件选择为增殖球床填充率 80%; $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比为 3; $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  烧结密实度为 85%, $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  为 98%。

表 1 包层材料成分  
Table 1 Blanket material component

构件	材料	理论密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表观密度	体积份额	填充率	总密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
包层	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>	3.42	0.85	0.923	0.2	2.024 279 1
	Be <sub>12</sub> Ti	2.26			0.6	
	SiC	2.975			0.077	
Be 装甲	Be	1.779				1.779
第一壁	低活化铁素体钢	7.7		0.535 71		4.124 997 8
	SiC	2.975		0.535 7		1.593 707 5

表 2 包层材料组合方案氚增殖率  
Table 2 Tritium breeding ratio of blanket material selection

材料	氚增殖剂/中子倍增剂/结构材料	氚增殖率(Li)	氚增殖率(Be)	总氚增殖率
Be <sub>12</sub> Ti	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> /Be <sub>12</sub> Ti/Ferritic	1.375 34	1.75×10 <sup>-2</sup>	1.39
	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> /Be <sub>12</sub> Ti/SiC	1.367 08	1.81×10 <sup>-2</sup>	1.39
	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> /Be <sub>12</sub> Ti/Ferritic	1.422 19	1.77×10 <sup>-2</sup>	1.44
	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> /Be <sub>12</sub> Ti/SiC	1.402 87	1.83×10 <sup>-2</sup>	1.42
Be	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> /Be/Ferritic	1.520 69	2.04×10 <sup>-2</sup>	1.54
	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> /Be/SiC	1.526 11	2.12×10 <sup>-2</sup>	1.55
	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> /Be/Ferritic	1.569 52	2.06×10 <sup>-2</sup>	1.59
	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> /Be/SiC	1.551 88	2.14×10 <sup>-2</sup>	1.57

从表 2 可见, Be<sub>12</sub>Ti 作为中子倍增剂的包层氚增殖率仅比 Be 的包层低 10%, Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 作为氚增殖剂的包层氚增殖率仅比 Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 低 3%, 均在可实现氚自持的范围内。

### 2.2 <sup>6</sup>Li 富集度选取

中子-锂反应的净效果是在包层中释放能量, 同时产生足够的氚来维持聚变堆燃料供应。固态陶瓷包层通常采用铍来倍增中子, 同时慢化中子, 通过提高<sup>6</sup>Li 的富集度来提高产氚能力, 但<sup>6</sup>Li 富集度的提高也会以损失聚变堆的经济性为代价。所以,<sup>6</sup>Li 的富集度不能取的过高。

增加<sup>6</sup>Li 富集度, 用 MCNP<sup>[8]</sup> 计算得到氚增殖率随<sup>6</sup>Li 富集度的变化曲线示于图 4。填充率为 80%。材料为 Be<sub>12</sub>Ti、Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>、SiC, 其中, Be<sub>12</sub>Ti 和 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 球体积比为 3。

从图 4 可见, 随着<sup>6</sup>Li 富集度的增加, 氚增殖率并非一直增加。<sup>6</sup>Li 富集度在 30%~80% 范围比较合适, 这样, 可兼顾产氚性能和材料制造的经济性。

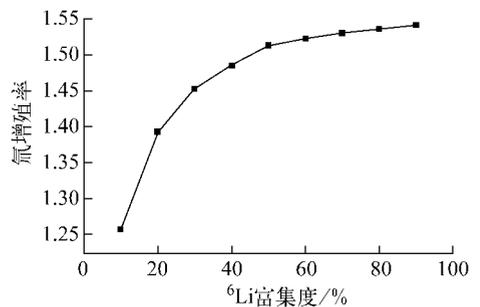


图 4 <sup>6</sup>Li 富集度对氚增殖率的影响  
Fig. 4 Influence of <sup>6</sup>Li enrichment on tritium breeding ratio

### 2.3 Be<sub>12</sub>Ti 和 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 体积比的选取

在 40% <sup>6</sup>Li 富集度下的体积比选择(填充率 80%)示于图 5。

从图 5 可见, 在 Be<sub>12</sub>Ti 和 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 球体积比高于 4 时, 通过增加 Be 的份额来提高氚增殖率已变得趋缓, 且靠近包层第一壁 Li 的产氚消耗快, 较远处的 Li 消耗慢, 燃耗分布差异大。而 Be<sub>12</sub>Ti 和 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 球体积比低于 2 时, 氚增

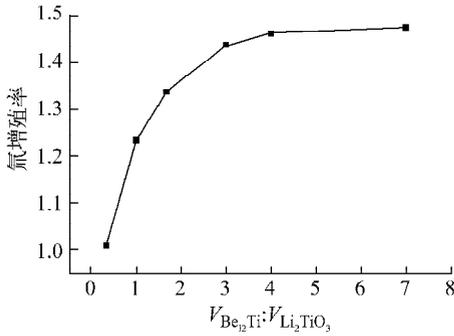


图5  $\text{Be}_{12}\text{Ti}/\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比对氚增殖率的影响

Fig. 5 Influence of  $\text{Be}_{12}\text{Ti}/\text{Li}_2\text{TiO}_3$  volume ratio on tritium breeding ratio

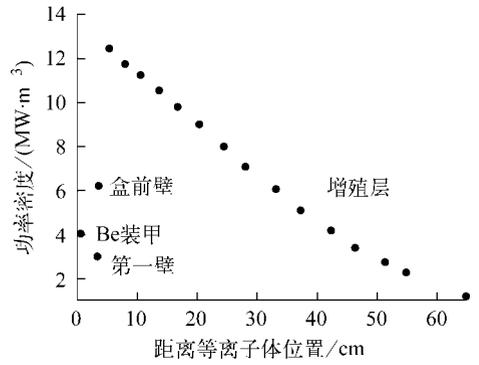


图7 功率密度分布

Fig. 7 Power density distribution

殖率较低。因此,选择  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比为 2~4 较为合理。

### 3 热工流体计算及分析

#### 3.1 热工流体计算模型

对聚变堆固态包层的模型进行对称近似,取第一壁冷却管板中 1 个冷却通道进行热工计算,在增值单元内,取 3 个冷却管进行热工计算,两侧均为绝热边界条件(图 6)。

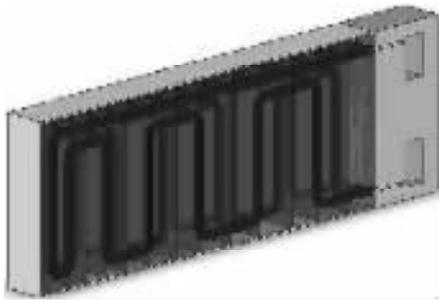


图6 热工计算模型

Fig. 6 Thermohydraulics calculation model

为验证包层概念的热工可行性,进行了初步验证计算。计算中,填充率取 60%,  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比取 4。此时,通过物理计算得到氚增殖率为  $1.194 = (\text{Li}_2\text{TiO}_3)1.17698 + (\text{Be}_{12}\text{Ti})1.73604 \times 10^{-2}$ 。第一壁表面热流为  $0.5 \text{ MW/cm}^2$ ,增值单元内功率密度分布示于图 7。

#### 3.2 热工流体计算结果

使用 Fluent 流体计算程序,选择工作压力 8 MPa。球床的导热系数参考欧洲和日本的实

验数据<sup>[5]</sup>。第一壁通道入口氦气质量流速  $0.11 \text{ kg/s}$ ,入口温度  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在第一壁温升  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ 。增殖区冷却通道氦气质量流速  $0.156 \text{ kg/s}$ ,入口温度  $294 \text{ }^\circ\text{C}$ ,氦气出口温度  $475 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温升为  $181 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

Be 装甲最高温度  $544 \text{ }^\circ\text{C}$ ,低于 Be 的限制温度  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,第一壁冷却条件良好,基本满足热工要求,温度分布示于图 8。增殖区最高温度  $898 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度分布示于图 9。从图 9 可见,包层温度分布较均匀。热点位于冷却气体出口侧的增殖区。通过调节各层的厚度及交错排列冷却气体入口。可降低热点的温度,进一步均匀化温度分布。

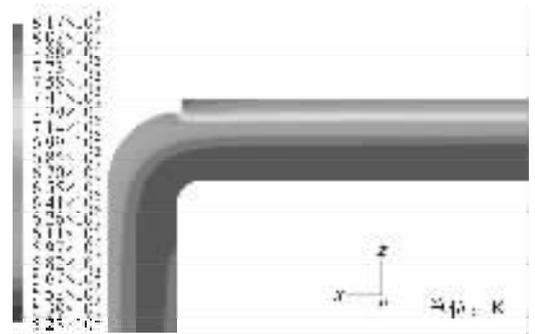


图8 第一壁温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in first wall

### 4 结论

$\text{Be}_{12}\text{Ti}$ 、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  混和球床固态包层概念在中子学、热工和安全等方面具有优良性能,其中,  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  作为中子倍增剂,  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  作为氚增殖剂。  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  相对贵金属而言,具有如下优良

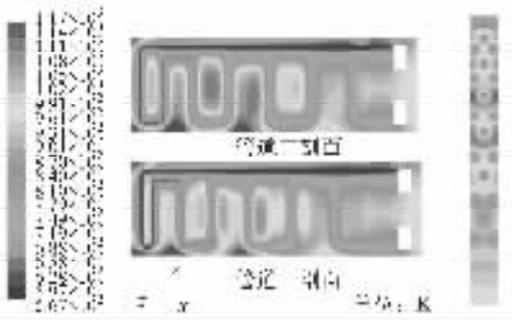


图9 增殖区温度分布

Fig. 9 Temperature distribution in breeder zone

性能:1) 较低的辐照损伤,易制造,具有耐高温性;2)  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  的物理和化学高温相容性好;3) 采用  $\text{SiC}$  或  $\text{ZrC}$  作为结构材料,提高中子学及耐高温性能,最高承受  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ ,可提高氦气出口温度,提高热效率;4) 第一壁冷却管为 U 型管板,入口和出口交错排列,均匀化传热,降低热应力。在包层内部,对增殖区的冷却采用冷却管,使用两种位置尺寸的管道,交错排列,提高单管移出热效率,降低结构材料的体积。聚变堆包层冷却管道采用单一直径的管道,易制造,且不必考虑流量分配;同时,两种不同位置尺寸的管道单管行程降低一半,有效减少压降。

从热工分析计算结果可看出,包层的温度最高点在靠近第一壁的前几层  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,球床的最高温度低于材料的温度限值,温度分布合理均匀。

从中子学分析的结果可看出,选择  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比为  $2\sim 4$  较合理;在  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  和  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  球体积比为 3 时, $^6\text{Li}$  富集度范围为  $30\%\sim 80\%$  较为适宜。

进一步的设计,可考虑把包层增殖区的冷却管的氦气入口和出口交错排列,以降低由于温度分布不均导致的热应力,减少变形。包层

需要进一步研究的难点是混和小球的导热率等热物性,以及结构材料  $\text{SiC}$  管道的制造、密封、抗热应力等性能。

#### 参考文献:

- [1] 吴宜灿,汪卫华,刘松林,等. 聚变发电反应堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1): 76-85.  
WU Yican, WANG Weihua, LIU Songlin, et al. Conceptual design study on the fusion power reactor FDS-II [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(1): 76-85 (in Chinese).
- [2] FENG Kaiming. Progress and status of Chinese HC-SB TBM design [C]//TBWG-14 Meeting. Naka; [s. n.], 2004: 15-17.
- [3] YAMADA H. Preliminary neutronics estimation for demo blanket with beryllides [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 69: 269-273.
- [4] KAWAMURA H. Present status of beryllides R&D as neutron multiplier [J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333: 112-118.
- [5] NAKAMICHI M. Compatibility test between  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 69: 257-261.
- [6] BOCCACCINI L V, FISCHER U, GORDEEV S, et al. Advanced helium cooled pebble bed blanket with  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  as structural material [J]. Fusion Engineering and Design, 2000, 49-50: 491-497.
- [7] ENOEDA M. Design and technology development of solid breeder blanket cooled by supercritical water in Japan [J]. Nuclear Fusion, 2003, 43: 1 837-1 844.
- [8] BRIESMEISTER J F. MCNP: A general Monte-Carlo N-particle transport code (version 4C), LA-13709-M [R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2000.