

CNIC-01777

SWIP-0182

产氙聚变堆概念设计系统研究

何开辉

(核工业西南物理研究院,成都,610041)

摘 要

提出了基于球环类型的先进氙生产堆概念设计,它是聚变能发展的中间应用。与传统托卡马克氙生产堆不同,设计中利用了球形环的先进等离子体物理性能和紧凑的结构特征,并尽量利用真空室内的空间安置氙生产包层以减少氙泄露而增加氙增殖率,达到年生产氙 1 000 g 的目标,相应的堆利用因子为 40%。在 2D 中子学计算的基础上提出了较为完整的初步概念设计。逐项进行了分析,同时对设计的风险、不确定性和后备方案也做了概括的解释。为下一步更详细、具体的概念设计提供了直接的依据和重要的参考价值。

关键词: 氙生产堆 氙增殖率 概念设计

Study on Conceptual Design System of Tritium Production Fusion Reactor (*In Chinese*)

HE Kaihui

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

Conceptual design of an advanced tritium production reactor based on spherical torus, which is intermediate application of fusion energy, was presented. Different from traditional tokamak tritium production reactor design, advanced plasma physics performance and compact structural characteristics of ST were used to minimize tritium leakage and to maximize tritium breeding ratio with arrangement of tritium production blankets as possible as it can within vacuum vessel in order to produce 1 kg excess tritium except self-sufficient plasma core, corresponding plant availability 40% or more. Based on 2D neutronics calculation, preliminary conceptual design of ST-TPR was presented. Besides systematical analyses; design risk, uncertainty and backup are introduced generally for the backgrounds of next detailed conceptual design.

Key words: Tritium production reactor, Tritium breeding ratio, Conceptual design

引言

氚是氢的一种放射性同位素,尽管在自然界中存在,却很稀少。因为其半衰期较短——12.32 a,即每年的衰变率为 5.5%。宇宙中氚的总量大约 7.0×10^7 Ci ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$),全球稳态氚含量约 7 kg。氚是核武器的原料又是聚变反应的燃料,为了满足国防和民用的需要,生产氚势在必行。目前提取氚的生产主要集中在两类装置中进行:核反应堆和加速器。反应堆是用中子轰击 ^6Li 生产氚,而加速器是用中子轰击 ^3He 生产氚。

目前在 START^[1]装置上获得成功极大地刺激了人们对球马克 ST 建成电站和体积中子源的兴趣。因为这种概念具有很多优点,诸如极高的等离子体比压(β)值(约 50%),轴上较低的环向磁场(约 2 T),很高的自举电流份额 f_b ($>95\%$)以及紧凑的聚变等离子体堆芯。为此本设计也使用球环堆芯驱动的包层设计来生产氚。本文在中子学计算分析基础上进行球环型堆芯驱动的氚生产堆(ST-TPR)的概念设计,其目的是使所设计的氚生产堆能完成其设计目标——所生产的氚能满足我国国防和民用氚需求即年产氚 1 kg 的目标。

1 设计概况

本文的一个重要目的是应用现存的和正在发展的等离子体物理和技术(包括常规托卡马克和低环径比托卡马克),探索聚变的中间应用,一方面实现聚变的前期应用,使具有广阔前景和潜在优势的聚变为人类服务,另一方面以此为基础,完善和推进聚变物理和技术的发展及等离子体物理和技术的成熟和完备。由此,我们提出的氚生产堆是基于现有的 ST 物理和技术,使环向等离子体拉长(拉长度为 2.5~3.5)和单零的偏滤器位形(底部偏滤器),常规导体线圈产生磁场约束等离子体。等离子体腔室由第一壁所包围,径向向外是氚生产包层(TPB),等离子体腔和 TPB 在真空腔内,真空腔外、环向场线圈内是屏蔽层,其作用是使中子通量和核热通量对磁体的影响在允许的范围之内。等离子体加热和电流驱动位于屏蔽之外。图 1 是这个装置的模式示意图。

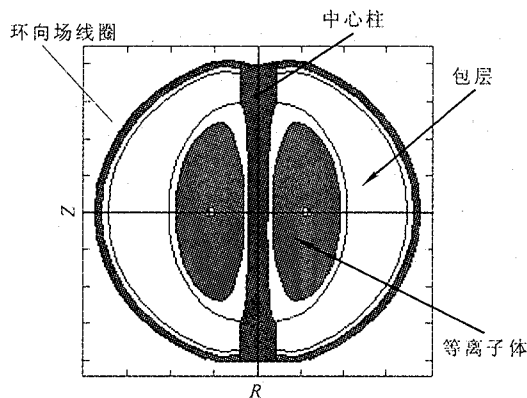


图 1 基于 ST 的氚生产堆模型示意图

由于堆设计主要是包层的设计,曾经参考过以下四类包层:

- (1) 铁体钢 FeS 结构/ Li_2O 氚增殖/水冷却/Be 中子倍增;
- (2) MANET 钢结构/ ^{17}Li - ^{83}Pb 共融体氚增殖/水冷却/Be 中子倍增;
- (3) 钒 V 结构/液体 Li 氚增殖和冷却剂/Be 中子倍增;
- (4) 不锈钢 SS316/Li 氚增殖/ $\text{He}4$ 冷却/Be 中子倍增。

我们结合使用一维中子输运程序 ONEDANT、二维中子输运程序 TWODANT^[2]和输运截面库接口程序 TRANSX2.15^[3]对第四种方案进行了多群、离散坐标中子输运计算。氚增殖率 TBR 随 ^6Li 丰度的增加而增大,选择 ^6Li 丰度为 92%,一维计算结果作为参考,二维

计算结果得到的 TBR 作为设计值。对其他三种情况的计算参考 W. M. Stacey^[4,5] 的常规托卡马克氦生产堆设计。

2 净氦生产计算

首先从结构尺寸上考虑年生产氦 1 kg 要求的堆结构尺寸,暂不考虑堆芯的要求。设中子壁负载为 Γ_n (MW/m²),面对等离子体的内外包层第一壁的表面积之和为 A (m²),则单位时间产生的中子数为

$$\frac{\Gamma_n [\text{MW/m}^2]}{14.1 [\text{MeV}] \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}]} \cdot A [\text{m}^2] = 4.4326 \times 10^{17} \Gamma_n \cdot A [\text{s}^{-1}]$$

考虑 D-T 反应和氦增殖率 TBR,反应后经包层增殖得到的氦为

$$4.4326 \times 10^{17} \Gamma_n \cdot A \cdot \text{TBR} [\text{s}^{-1}]$$

设利用因子为 PF,则年总氦生产量为

$$4.4326 \times 10^{17} \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1.6726 \times 10^{-27} \times 3 \cdot \Gamma_n \cdot A \cdot \text{TBR} \cdot \text{PF} [\text{kg}] \\ = 7.142 \times 10^{-2} \Gamma_n \cdot A \cdot \text{TBR} \cdot \text{PF} [\text{kg}]$$

由于生产的氦一部分要用作燃料,同时考虑到损失等因素,则净氦生产为

$$7.142 \times 10^{-2} \Gamma_n \cdot A \cdot (\text{TBR} - 1.05) \cdot \text{PF} [\text{kg}]$$

对于体积中子源一般考虑 Γ_n 为 1.0 MW/m²,当 PF 为 40% 时,则生产 1 kg 氦 TBR 和面积之间的关系为

$$A = \frac{35.0}{\text{TBR} - 1.05}$$

若内外包层第一壁的半径为 r_{in}, r_{out} , 则

$$2\pi(r_{in} + r_{out})h = \frac{35.0}{(\text{TBR} - 1.05)h} \quad r_{in} + r_{out} = \frac{5.57}{(\text{TBR} - 1.05)h}$$

对于 ST 等离子体,一般拉长度在 2.0~3.5,对小半径在 1 m 左右时,高度在 2.5~3.5 m,经过中子学初步计算 TBR 一般在 1.6 以内,考虑 h 为 3 m,则内外半径之和至少要 3 m。因此只从结构上考虑要生产 1 kg/a 的氦,堆的大半径至少要 1.5 m,小半径为 1.1 m 左右。

再从堆芯考虑,对每 100 MW 的聚变功率,聚变中子源消耗的氦大约是: $5.6 \times \text{PF}$ kg/a^[4,5],表 1 列出了对不同聚变功率和利用因子时所需 TBR 值。

表 1 生产 1 kg/a 的氦对不同聚变功率和 PF 所需的 TBR¹⁾

聚变功率/MW	PF=0.4 时对应的 TBR	PF=0.5 时对应的 TBR	PF=0.8 时对应的 TBR
100	1.45(2.24)	1.36(2.8)	1.23(4.48)
200	1.227(4.48)	1.18(5.6)	1.114(8.96)
400	1.114(8.96)	1.09(11.2)	1.06(17.92)

¹⁾ 未计及 5% 的氦损失。表内括号中的数据为聚变中子源消耗的氦量(kg),不包括初始投料量。

因此,对生产 1 kg/a 的氦,设定利用率为 0.4,如果聚变功率为 100 MW 时所需的 TBR 为 1.45,为了生产这些氦要消耗氦 2.24 kg,即生产 1 kg 氦实际上是生产 3.24 kg 氦。对这个尺寸的装置($\Gamma_n = 1$ MW/m²),其聚变功率为 75 MW,因此对 PF=0.4 时,若 TBR 能达到

1.6,就能满足年生产 1.0 kg 氙的目标,这个目标不但符合我国的现实需求同时还可以在核工业西南物理研究院的 HL-2A 的下一代或二代装置上进行试验,为此下面开始探索最佳设计方案。

3 中子学优化设计

为了使设计的氙生产堆能够生产足够的氙,主要通过提高包层的 TBR,为此,采用 1D 优化,2D 出结果的原则进行包层设计。图 2 是进行中子输运计算的中子学流程。图中 TEXT 文件是单个核素的数据库,包含核素的各种反应的反应截面。BBC 并库程序的主要功能体现在:二进制和十进制转换、合并、提取、添加和删除(一个或几个)核素的截面库。本文主要是把十进制的库文件转换并合并成二进制的多群核数据库文件 MATXS,以便输运截面库接口程序 TRANSX 能够识别其格式。接口程序再按照不同的输出选择产生适合不同中子输运程序能够使用的适用库。CARD 文件(适用截面库)和 XSLIB 文件(适用截面库,两文件内容一样,只是名字不同)是一维和二维中子输运程序 ONEDANT 和 TWODANT 能够识别和使用的截面库。这两个中子输运程序的主要输出包括中子注量率、各种核素的反应率以及 TBR。在计算中主要考察的就是 TBR 的大小以及中子平衡关系。

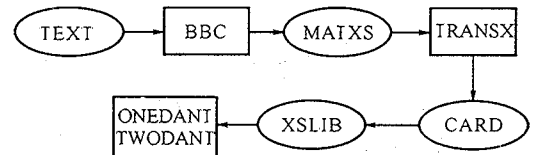


图 2 中子学计算流程示意图

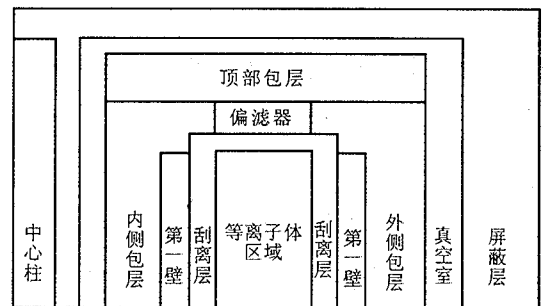


图 3 2D 中子学计算模型示意图

在经过了許多 1D 和 2D 中子学计算分析的基础上,我们提出的中子学设计方案是:内侧包层、外侧包层以及偏滤器外真空室内放置的氙生产包层都生产氙,同时在偏滤器靶板表面覆盖一层 Be 起保护和增殖中子的双重功能。其 2D 中子学计算模型示意图如图 3 所示。表 2 列出了计算模型各区域的名称、尺寸范围、厚度和材料组成。之所以这样选取,主要原因就是在中子学计算的基础上尽量提高 TBR,从而满足年产氙量 1 kg 的目标。2D 中子学计算得到的 TBR 达到 1.682。内侧包层的 TBR 为 0.124 5,外侧为 1.374,偏滤器外包层的 TBR 为 0.179 9。相应的 1D 计算得到的总 TBR 为 1.928,⁶Li 在外侧包层的 TBR 为 1.818,内侧为 0.105;⁷Li 的总 TBR 为 0.005 45,可见 TBR 主要是⁶Li 的贡献(⁶Li 的丰度高达 92%)。

4 ST-TPR 总体设计

在中子学计算的基础上提出的 ST-TPR 堆尺寸的径向尺寸分布列于表 3,同时为了对比,也列出了传统托卡马克氙生产堆(TTPR)^[4,5]的设计参数。

表 2 设计方案的结构尺寸及材料组成

结 构	尺寸范围/cm	厚度/cm	材料组成		
中心柱	0~31	31	Al 0.7		He 0.3
内侧屏蔽层	31~34	3	B ₄ C 0.3	STEEL 0.3	He 0.4
内侧真空室	34~37	3		STEEL 0.7	He 0.25
内侧包层	37~43	6	Be 0.6, Li 0.1	STEEL 0.1	He 0.2
内侧第一壁	43~44	1	Be 0.6	STEEL 15	He 0.25
刮离层	44~50	6			
等离子体	50~270	220			
刮离层	270~276	6			
外侧第一壁	276~277	1	Be 0.6	STEEL 0.15	He 0.25
外侧包层	277~324	47	Be 0.6, Li 0.1	STEEL 0.1	He 0.2
空隙	324~326	2			
外侧真空室壁	326~346	20		STEEL 0.7	He 0.25
外侧屏蔽层	346~366	20	B ₄ C 0.3	STEEL 0.3	He 0.4
偏滤器(垂直方向)	310~330	20	Be 0.4	STEEL 0.3	He 0.3
底部包层	330~350	20	Be 0.6, Li 0.1	STEEL 0.1	He 0.2

表 3 径向尺寸

参 数	符号	ST-TPR	TTPR
大半径/m	R	1.6	5.5
小半径/m	a	1.1	3.0
第一壁厚度/cm	d_{tw}	1.5	1.8
刮离层厚度/cm	d_{sol}	6	10
包层厚度/cm	d_{blk}	6(内侧)+47(外侧)+20(顶部)	50
真空室厚度/cm	d_{v}	20	21
屏蔽层厚度/cm	d_s	20	60
拉长度	κ	3.0	1.8

4.1 堆芯考虑

堆芯是关注的重点,直接关系到所设计的装置何时能够实现。本文只提出堆芯的参数。表 4 列出了 ST-TPR 和其他相关装置的堆芯参数,以便比较,其中 ST-VNS^[6]是中国科学院合肥等离子体物理研究所设计的体积中子源;STPP^[7]是欧洲设计的球环装置;ARIES-NS 数据来源于美国 UCSD 的设计;ST-VNS(I-II)^[8]是 E. T. Cheng 的设计。ITER-FEAT (ITER 聚变能先进托卡马克)于 2001 年 7 月完成工程概要设计,表 4 所列是其最终设计参数。ST-TPR 的物理参数与“中等先进托卡马克”运行模式对应的参数相当。

产生 75 MW 的聚变功率结合生产 1 kg 多余[额外]的氦所需要的最小大半径在 1.6 m 左右,相应的第一壁峰值热通量为 0.69 MW/m²。为了对照,TTPR 在设计时对应生产 2 kg 氦产生 250 MW,500 MW 和 700 MW 聚变功率所需的最小大半径分别为 4.9 m,5.3 m 和

5.5 m,相应的峰值热通量分别为0.2,0.3和0.4 MW/m²(峰值因子为1.5),假定等离子体功率平均分配在第一壁和偏滤器上。我们在设计时也使用了相同的功率峰值因子,对应的第一壁平均14-MeV中子通量为1.0 MW/m²。

表4 堆芯参数及与其他设计的比较

参 数	ST-TPR	ST-VNS	SPPP	TTPR	ITER-FEAT	ARIES-NS	ST-VNS(I-II)
总聚变功率(P_f)/MW	75	100	3 200	750	750	80	39~59
大半径(R)/m	1.6	1.4	3.4	5.5	6.2	1.60	0.8
中子壁负载(Γ_n)/(MW·m ⁻²)	1.0	1.0	3.7	1.2	1.0	0.589	1.0~1.5
等离子体电流(I_p)/MA	9.5	9.2	31	10.7	15.0	12.826	8.6~10.5
环径比	1.45	1.4	1.4	3.55	3.1	1.6	1.33
拉长度(κ)	3.0	2.5	3.0	1.8	1.84	3.621	2.3
三角形变(δ)	0.45	0.45	0.45	0.5	0.5	0.664	
归一化 β 值(β_N)	6.5	6.5	8.2	3.9	1.81	7.38	
相对 β 值(β_r)/%		35	58		2.6	38.84	
自举电流份额/%	80	81	88	80		80	
环向场(B_t)/T	2~2.5	2.5	2~2.5	5.8	5.3	1.879	1.8
边界安全因子(q)	5	5.5	3.1	4.0	3.0	10.972	
电子平均密度($\langle n_e \rangle$)/10 ²⁰ m ⁻³	1.0	1.1	1.1	1.9	1.0	1.1	1.1~1.8
电子平均温度($\langle T_e \rangle$)/keV	10.0	9.5	19.2	10.0	20	19	24~26(T_{90})
辅助加热功率(P_{aux})/MW	20	19	27	80	40	24.246	36~82

4.2 磁体

ST-TPR的磁体系统将使用常规磁体,运行的最大磁感应强度为2~2.5 T。这样的设计是有广泛的设计基础的,同时也可以在欧洲MAST和美国NSTX实验运行的基础上得到广泛的数据库而进一步发展。这方面的内容在以后更详细的设计中考察。

4.3 加热和电流驱动问题

ST-TPR考虑四种类型的等离子体加热和非电感电流驱动系统:

- (1) 中性束注入(NBI);
- (2) 离子回旋共振射频加热(ICRH);
- (3) 电子回旋共振射频加热(ECRH);
- (4) 低混杂波共振射频加热(LHRH)。

但是考虑到天线中的中子吸收会显著降低TBR,因此不使用ICRH方式。由于要达到“反剪切”先进托卡马克运行模式,有必要在等离子体中心与偏离轴的位置均进行非电感驱动,中心电流驱动可以采用高效的NBI和ECRH,偏离轴的位置可以采用NBI、LHRH和ECRH联合驱动的方式。电流驱动要求大致分布如下:

5 MW 1.3 MeV的NBI,10 MW 5 GHz的LHRH和5 MW 140~170 GHz的ECRH驱动方式。这样的系统要求一方面可以在ITER-FEAT中得到发展与测试,同时还可以在

NSTX, MAST 等球环装置实验中演示和验证。

4.4 真空室

为了避免中子损伤,真空室位于 TPB 后、屏蔽层前,材料仍然使用 SS316,当然也可以考虑使用 FeS 作为备份材料。其厚度通过简单估计以使其能承受 10 大气压运行产生的机械应力为宜。在中子学计算中由于其厚度对内侧包层的 TBR 影响较大,所以内侧厚度设定为 3 cm,这样的厚度是能够满足热工应力设计要求的^[4,5],外侧真空室厚度在初步的设计中定为 20 cm,这个值只作为参考,因为在中子学计算中其值大小对结果影响不大,更多的是从热工分析考虑,要分析其精确的应力和应变必须通过复杂的有限元计算分析,这项工作留在以后更详细的设计中进行。

4.5 氦生产包层 TPB

对 ST-TPR 的氦生产包层 TPB 的设计问题,参考众多包层(如 ITER-FEAT 的包层设计、欧洲示范堆 DEMO 包层)设计的特征,我们提出了有自己特色的包层概念,通过中子学计算位形优化和排热系统的确立,使之能达到很大的 TBR,主要参数列于表 5。其中关于 ST-TPR 冷却剂压力、流速等必须经过水力学计算,留待以后更详细的设计计算。ST-TPR 所得到的 TBR 的值是二维计算结果所得,TPR 是一维计算值乘以 85%后的值。

表 5 包层设计参数

参 数		ST-TPR	TPR	DEMO
结构	材料	316SS	FeS	MANET
	体积份额/%	10	9.5	20.5
氦生产	材料	⁶ Li, ⁷ Li	¹⁷ Li-83Pb, ³ He	¹⁷ Li-83Pb
	体积份额/%	10	18.1	77.4
中子倍增剂	材料	Be	Be	Pb
	最大温度	385 °C	385 °C	NA
	体积份额	60%	65.3%	NA
冷却剂	材料	⁴ He	H ₂ O	H ₂ O
	压力/MPa	10	14	15
	进出温度/°C	200/300	270/<336	300/325
	管直径/mm	5	5	11
	管厚度/mm	1.5	1	2.8
	体积份额/%	20	1.5	2.1
TBR		(TBR) ⁶ Li 1.678	(TBR) _{LiPb} 0.92	(TBR) _{LiPb} 1.13
		(TBR) ⁷ Li 0.004 31	(TBR) _{He} 0.51	
		(TBR) _{TOI} 1.682	(TBR) _{TOI} 1.43	

注:NA 为不可得到的。

TPB 由外侧子包层、内侧子包层和顶部包层组成。其模型如图 3 所示。各层厚度和材料组成以及氦增殖率见表 5。如前面所述内侧包层由于空间较窄,只有 6 cm 厚,与内侧真空室和屏蔽层的厚度之和相当。尽管内侧增殖的氦较少,同时也挡住了中子穿过中心柱到

达另一侧的包层增殖中子,但这种设计在整体上效果较好,可以使总 TBR 达到 1.682,减去聚变燃料的 1 个氦原子和损失在内(考虑为 1.05),还有 0.632 的净 TBR 用于生产我们所需要的氚。这样,当利用率在 40%时,可以实现年生产氚 1 kg。

从表 5 可以看出,在三个包层中中子倍增剂 Be 的体积含量 60%是氚增殖剂 Li 的 6 倍,相当于 Li 均匀分布在 Be 块中。因此,我们对外侧包层的设计构想(如图 4 所示)是从等离子体中心向外的水平截面的一个子模块的大体分布。为了便于尽量均匀分布 Be,把每个包层模块分成几个小区(图示是两排每排 4 个小区,可以分得更细如 3 排,每排 5 个 Be 区),每个小区就是一个 Be 块区域,其中包括冷却管道和锂区,在后面的挡板上是总冷却管道。

我们对外侧包层的设计构想如图 4 所示。它是从等离子体中心向外的水平截面的一个子模块示意图。

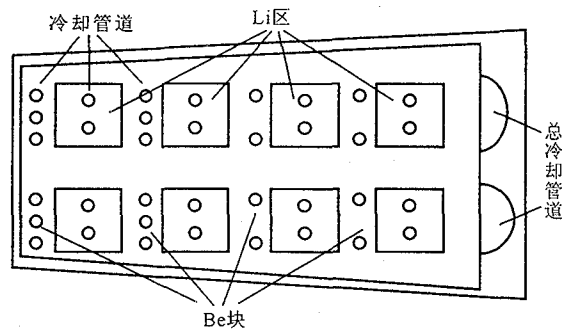


图 4 外侧氚生产包层模块水平截面示意图(部分)

对每一个 Be 块区域,其放大图如图 5 所示。第一壁表面的 Be 层厚度为 5 mm,覆盖在结构材料不锈钢上面,不锈钢的厚度为 10 mm,里面是冷却管道,冷却管道的内直径为 5 mm,外直径为 7 mm,即壁厚 1 mm,材料仍使用不锈钢。相邻冷却管道之间的距离为 5 mm,由于 Be 的体积很大,所以后面的主要区域就是 Be 块,里面也有冷却管道,中心是 Li 区,包含锂的结构材料仍然是 2 mm 厚的不锈钢,在 Li 区也放置两个冷却管道,所有冷却管道都可以使用同样的尺寸。在包层后面(即远离等离子体区域)的 Be 小区中,由于热量比前面的区域少,可以考虑使用两个冷却管道冷却 Be 区,如图 4 所示。至于内侧包层,由于其厚度很小,所以在初步设计中,考虑上述类型包层的一个小区,采用 3 个冷却管道进行冷却。顶包层由于处在偏滤器外,在计算中以平板模型处理,所以在实际设计中可以随设计空间的具体情况在板厚和板长方向分区,尽可能使中子漏失少,增大 TBR。

4.6 屏蔽问题

常规托卡马克的设计中使用屏蔽系统的目的是限制堆芯到超导环向场线圈的中子注量在运行寿命期间(如 40 a)的累积不超过一定的数量(如 TTPR 的设计为 40 a 不超过 $2 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$, ITER 的设计值为 10^{23} n/m^2),以及限制超导线圈中核热沉积不超过一定值(1 mW/cm^3)。这样对屏蔽的要求较高,同时屏蔽层的厚度也较厚。由于本设计使用的是常规线圈产生磁场,大大降低了对屏蔽的要求,从而使屏蔽层的厚度大为降低。在 ST-TPR 的设计中,我们设计的屏蔽层如图 6 的五层模型示意图,第 1,3,5 层是 4 cm 厚的不锈钢层,里面是冷却管道,冷却剂仍使用氦,当然也可以考虑使用水作为备份的冷却剂。第 2,4 层是

4 cm 厚的 B_4C 和冷却管道(管道由不锈钢壁构成)。由于屏蔽层的厚度直接关系到生物环境的安全问题,所以有必要进行放射性计算,根据中子剂量最终确定屏蔽层厚度。在以后的工作中将进一步进行此项计算分析。至于屏蔽层的材料问题,可以使用钨代替 SS316 作为结构材料,同时可以根据计算增加 B_4C 的厚度,达到更好的屏蔽效果。

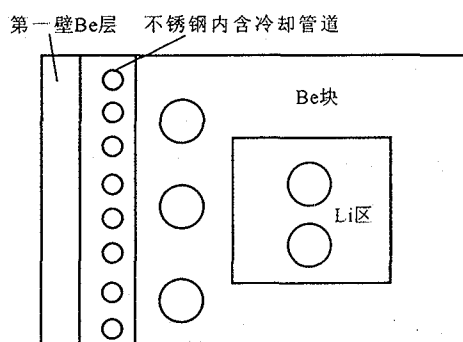


图5 面对等离子体表面一个包层模块的小区域的极向图

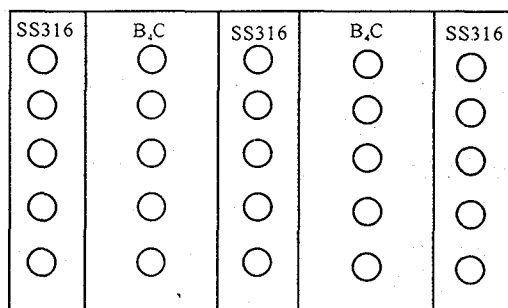


图6 屏蔽层的水平截面图

4.7 发展的风险、不确定性及后备方案

尽管我们设计的以 ST 为基础的氚生产包层的物理和技术是以 ITER-FEAT, NSTX 的物理技术为基础的,但是它们本身也是不完备的,还处在发展和完善之中。为此对 ST-TPR 的发展风险、不确定性及后备方案做一些简要的讨论。大体包括以下几个方面:

(1) 等离子体物理

ST-TPR 的等离子体运行参数是以中等先进托卡马克运行模式为基础的,这种模式目前在科学上正处于探索和实验之中。尽管 ITER 及 ITER-FEAT 以不同的物理假设为基础,但 ITER-FEAT 设计能够达到这类中等先进托卡马克模式,从而为 ST-TPR 的设计参数奠定了基础。目前的主要问题是相对于经验定标律(ITER89-P 和 ITER-98)的能量约束增强因子的数据库不完善,因为 ITER89-P 的数据库基本是以 20 世纪 90 年代以前的托卡马克数据为基础的,而具有很多不同于传统托卡马克特性的球环装置的数据库又与之有一定的差别,所以设计的基础有待进一步改善。目前 ITER-FEAT 的设计中约束增强因子对感应电流驱动方式为 $H=1$ 、非电感电流驱动方式为 $H<2$ (ITER 最初的设计值也为 2), ARIES 在系统设计时提出的 H 因子按照新的定标律也约为 2,与 TTPR 设计的指定值 3 相差较多,所以我们选择的值在 2.5。不过,如果这个值不能达到,ST-TPB 的等离子体参数可以通过其他手段获得足够的中子产量。第一,因为约束对等离子体电力的依赖关系很强,因此可以通过增加等离子体电流的方式来补偿约束增强因子的短缺,有计算表明^[4,5]: H 从 3.0 降到 2.5 可以通过增加等离子体电流从 10% 到 15% 来补偿。第二,可以通过增加辅助加热功率的方法来补偿约束增强因子的短缺。因为 ITER89-P 的经验定标律有关系:

$$\tau \sim H(P_a + P_{AUX})^{-1/2}$$

因此可以通过调整辅助加热规律的方法来改善 H 因子的值。

(2) 加热及电流驱动

ST-TPR 使用的三种类型辅助加热/电流驱动系统包括 1.3 MeV 中性束, 5 GHz 低混

杂频率加热和 140~170 GHz 电子回旋频率加热,这些系统都是在 ITER, ITER-FEAT 的设计基础上发展和提高的,如果任何一个系统的发展遇到问题,尽管可以通过其他系统得到补偿,但这样也可能对堆芯要求的先进托卡马克位形所要求的电流剖面的获得造成困难。因此,密切注意国内外电流驱动和等离子体加热是设计成功与否的关键所在。

(3) 结构材料和氚生产材料

在结构材料的选取上我们使用了具有广泛数据库的 SS316,同时这种材料也具有在辐照环境下使用的经验基础。作为备份材料,FeS 具有更好的热-机械和抗辐照特性,在目前国际上对聚变堆材料进行广泛研究的基础上,钒合金 V-4Ti-4Cr 具有比 FeS 更好的抗辐照、低活化和热机械特性。对于 FeS 材料,尽管具有在非辐照条件下的数据库和经验基础,但是在辐照条件下却具有很多不确定性,同时还具有易脆的特点,所以在常规托卡马克氚生产堆 TTPR 设计时也把 SS316 作为满意的候选材料。因此在我们设计的 75 MW 球环位形托卡马克结构材料选择上,SS316 是能够满足设计需要的。

对于氚生产材料,欧洲广泛进行 ^{17}Li - ^{83}Pb 共熔体的研究^[10],日本和欧洲也在进行含锂陶瓷材料的研究,如 Li_2O 。有计算表明,使用上述两种氚增殖材料对 TBR 影响不大,不过对氚的提取效率等会有不同程度的影响,本设计仍然选取 Li 作为增殖剂。

(4) 设计细节

在任何大型设计中,不免由于细节问题的疏忽导致这样那样的问题,甚至致命的错误和不可挽回的经济损失。我们在设计 ST-TPB 时尽管力求站在现实的角度以及对堆芯的假设尽量保守,但不可避免的是越详细的设计研究会导致对氚生产能力越不乐观的评估,例如在反常运行条件下需要更多的包层支撑结构或者更多的冷却剂(管道),亦或更多的加热和诊断窗口等,这都会不同程度地减小 TBR。同时目前的设计都没有考虑三维计算,势必得到的结果更低。另一方面,对于堆的 PF,在堆初期运行时可能不会达到设计要求的 40%,从而,也不能完全满足年产氚量 1 kg 的要求,不过,随着装置的运行,技术的发展,这样的要求会逐步达到并可能超过的。

5 结果及讨论

本文是基于 ST 的产氚聚变堆概念设计,其目标是年产氚量 1 kg。在中子学计算旨在提高 TBR 的基础上,提出了三环绕氚增殖包层设计新概念,该方案由于紧凑的 ST 堆芯及三环绕包层设计概念的使用,所得到的 TBR 高于 1.68,完全能够完成年产氚 1 kg 的目标。在此基础上对 ST-TPR 的总体设计进行了逐项论述,对设计方案的风险、不确定性及后备方案等也做了概括的解释。然而,目前的设计还是初步设计方案,还有很多问题没有考虑到或者提出的参数不够自洽,所以作者希望在以后的工作中能逐步完善、改进和提高所提出的设计参数、目标和细节。如,在系统设计中涉及到氚的提取、处理和储藏以及氚渗透和投料等问题,作者认为这些问题应该在更系统的研究中进行,所以留待以后解决。再如,氚生产性能的评估以及经济学问题等等也有待进一步深入研究。

致 谢

在完成本设计计算的过程中得到了核工业西南物理研究院堆设计与材料研究室冯开明研究员、张国书副研究员的帮助和有益的讨论,在此作者深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Sykes A, First Results From START, in proceedings of 18th Fusion Energy Conference 4-10 Oct. 2000, Sorrento, Italy
- 2 Alcouffe R E, et al. TWODANT-SYS: One-and Two-Dimensional, Multi-group, Discrete-Ordinate Transport Code System, CCC-547, Oak Ridge National Laboratory (1992)
- 3 McFarlane R E, TRANSX2: A CODE For Interfacing the MATXS Cross Section Libraries to Nuclear Transport Codes, LA-12312-MS, Los Alamos National Laboratory (1992)
- 4 Stacey W M, Favorite J A, Belanger M J, Granberg R D, Gimm S L, Kelly F A, Klima S, et al. A Tokamak Tritium Production Reactor. Fusion Technology, Dec. 1997, 32:563~589
- 5 Stacey W M, Aldridge J P, Beilke R L, Bryson L G, Davodson E P, Deterding T A, et al. A Tokamak Tritium Production Reactor Design II. Fusion Technology, July 1998, 33:443~455
- 6 Qiu L J, Wu Y C, Wu B, Liu X P, Chen Y P, Xu W N, Huang Q Y. Advanced Study of a Tokamak Transmutation System, in proceedings of 18th Fusion Energy Conference 4~10 Oct. 2000, Sorrento, Italy
- 7 Akers R J, et al. Steady State Operation of a Spherical Tokamak. Nuclear Fusion, 2000, 40(6)
- 8 Cheng E T, Martin Peng Y K, Ralph Cerbone, Paul Fogarty, John D. Galambos, Mark Tillack. Study of a spherical Tokamak based volumetric neutron source. Fusion Engineering and Design, 1998, 38:219~255
- 9 Post D E, et al. ITER Physics, ITER Documentation Series, No. 21, IAEA (1991)
- 10 Giancarli L, et al. Overview of EU Activities on DEMO Liquid Metal Breeder Blankets. Fusion Eng. Des. , 1995, 27:337; see also Water-cooled Pb-17Li DEMO Blanket Line: Status Report on the Related EU Activities, DMT 95/505, SERMA/LCA/1801, Laboratoire Central de l'Armement (1995)