

ITER 上窗口屏蔽中子学分析研究

郑善良, 刘松林, 林 辉, 曾 勤, 吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:利用 CAD/MCNP 自动建模程序 MCAM 建立 ITER 新上窗口中子学计算模型, 使用中子/光子耦合输运程序 MCNP/4C、IAEA 聚变核数据库 FENDL1.0 和集成上窗口模型的 ITER 基本中子学模型计算并分析上窗口新的工程设计的屏蔽能力以检验设计的合理性。结果表明, 与以前的上窗口设计相比, 新设计的上窗口的周围剂量控制点的快中子注量率、停堆剂量率以及线圈核热等都增大了好几倍, 建议进一步改进上窗口设计。

关键词:ITER; 中子学; 屏蔽; 上窗口

中图分类号:TL64.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2005)04-0361-06

Neutronics analysis of the upper port for ITER

ZHENG Shan-liang, LIU Song-lin, LIN Hui, ZENG Qin, WU Yi-can

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China)

Abstract: To confirm the sufficiency of shielding capability, the upper port geometry in the ITER 3-D basic model has been efficiently and reliably modified according to the updated drawings of the new design by using the home-developed CAD/MCNP interface code, i. e. MCAM. On the basis of the modified ITER 3-D model with new upper port geometry in comparison with those with the original upper port geometry, the distributions of fast neutron flux, dose rates after shutdown around the upper ports and nuclear heat in the PF-1 and PF-2 have been calculated by the MCNP/4C and the relevant data library FENDL1.0. An increase of several folds in the fast neutron flux, the nuclear heat and the shutdown dose rate for the new upper port design has been observed in the calculated results for the new design. The new design needs to be improved.

Key words: ITER; neutronics; shielding; upper port

收稿日期: 2005-07-11; 修回日期: 2005-08-25

基金项目: 在 ITER 国际工作组核分析合同任务框架下进行的(合同编号: ITA-73-01-CN, 2003)

作者简介: 郑善良, (1979—), 女, 安徽人, 从事中子物理学研究

1985年,在美、苏首脑的倡议和国际原子能机构(IAEA)的支持下,确立了一项重大国际科技合作计划——“国际热核试验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor,简称 ITER)”,其目标是要建造一个可自持燃烧(即“点火”)的托卡马克聚变实验堆,验证聚变反应堆的工程可行性^[1]。预期 ITER 运行时间约 20 a,中后期运行阶段为 D-T 运行阶段,将会放出功率高达 400 MW 强度的 14 MeV 高能中子,因此,ITER 核分析(主要指中子学分析)是 ITER 设计的一个重要步骤。ITER 核分析依赖于反应堆的运行条件、特定部件的辐射限制和堆运行与维修所要求的剂量率限制。为了确保堆运行过程中超导线圈上核热以及停堆后给维修人员造成的剂量在允许范围内,设计人员必须要结合部件的设计和屏蔽的部署来使得最终的辐射危害达到最小程度^[2],而通过窗口(用于诊断系统、加热系统、管道等)附近的辐射场计算是核分析重要内容。在中国和 ITER 国际合作组织签署的上窗口屏蔽核分析研究合同任务(ITA-73-01-CN)框架下,第一次完成了中国与 ITER 国际组织签署的合同研究任务。

ITER 作为一个托卡马克聚变实验堆,设计了 18 个上窗口,分别为 9 个奇口和 9 个偶口,每 20 度扇形区域内分布一个窗口,它是诊断和屏蔽包层冷却管道的通道,在真空室外部的某些区域,停堆后一定时间应该允许人员到达维修,例如极向场线圈 PF-1 和 PF-2 线圈盒就在上窗口附近,因此需要足够的屏蔽以降低其剂量率水平。ITER 上窗口设计的变动主要是基于对部件的空间分配和实际屏蔽需要的综合考虑,由于装置空间比较紧张,但是仍然需要保证足够的屏蔽能力,因此根据需要重新分配空间设计了上窗口^[3-4]。一方面偶口在工厂制造焊接,很容易加上屏蔽块,另一方面,奇口需要在装置上进行焊接操作,需要上窗口旁边有足够大空间,然而在装置上安装屏蔽块并不太容易,所以目前的设计是仅仅将线圈盒以及其他需要维修人员到达的部件放在偶口,而减小奇口的屏蔽需要。

1 上窗口模型

根据新的上窗口的工程设计,更新 ITER 原 MCNP 计算模型中对应的上窗口模型,为了能够有效地完成上窗口模型更新和在基本模型中正确地集成,借助于 CAD/MCNP 自动建模程序 MCAM^[5],将上窗口新的工程设计 CAD 模型转换成 MCNP 计算模型输入文件,再更新集成到 20 度 ITER 基本计算模型,将新模型的计算结果与原模型进行比较分析。与原上窗口模型(见图 1)相比,新模型的主要改动如下:

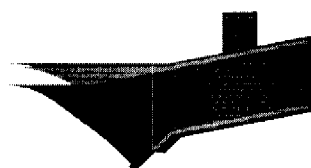


图 1 原上窗口模型(包括上下斜块)
Fig. 1 The original upper port
(with the upper and lower chamfer)

1) 去掉上斜块,在斜块位置增加辅助屏蔽块(简称辅屏)。因为维修人员到达的位置在上窗口偶口旁边,所以偶口的辅屏比奇口的大一点。

2) 去掉下斜块。

3) 靠近真空室的第一部分侧壁水层由原来的 8 cm 减薄为 3 cm(见图 2)。

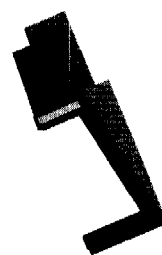


图 2 上窗口偶口
Fig. 2 The even upper port

4) 中间部分屏蔽板之间的 8 cm 的水层全部变化为 2 cm 的空隙(见图 3)。

5) 内侧壁的位置向内减小了 7 cm。

考虑到环向对称性,中子学计算使用 ITER 20 度扇形(包括一半上窗口的奇口和偶

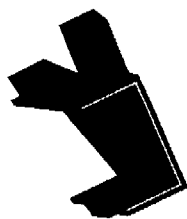


图3 上窗口奇口
Fig.3 The odd upper port

口)模型和反射边界条件。

2 程序和数据

快中子注量率和线圈核热的计算由 MCNP/4C^[6]完成,停堆剂量率通过“一步法”^[7-9]计算得到。通常 MCNP 程序模拟计算中子/光子/电子输运过程中的光子是瞬发光子(即核反应过程中释放出的光子),而停堆剂量率则需要计算运行中由于核反应生成的一些放射性核在停堆后自然衰变过程中释放的衰变光子的输运过程,目前应用于计算 ITER 停堆剂量率的方法有两种:一是“一步法”;另一种是“二步法”^[10]。“一步法”就是将 MCNP 原程序中处理瞬发光子部分修改成可以处理衰变光子,并且将相应的核数据库中的瞬发中子数据替换成该核通过中子核反应可能生成的放射性核的衰变光子数据,从而使用修改过的 MCNP 程序和包括衰变光子信息的数据库来模拟中子和衰变光子的输运计算,从而得到停堆后的剂量率。

上窗口的中子学模型借助 MCAM 程序^[5],由 CAD 工程设计模型自动转换而得到。MCAM 是中国科学院等离子体物理研究所 FDS 团队研发的 MCNP 自动建模及可视化程序,可以实现 CAD 模型和 MCNP 计算几何模型之间的转换,且具备基本的建模能力和 MCNP 属性可视化编辑功能。此程序的利用不仅使得操作更为有效,而且减少了建模错误。使用 MCAM 将经过适当简化(去掉圆角和小螺钉等)的上窗口 CAD 模型转换成 MCNP 计算模型,再集成到 ITER 的 MCNP 基本中子学模型中,为了检验模型的正确性,可将 MCNP 计算模型通过 MCAM 反演成三维视图模型和 CAD 模型进行比较。

3 计算和分析

为了评估上窗口的屏蔽能力,计算了修改之后的上口附近的快中子注量率(>1 MeV)的分布、极向场线圈的核热和停堆剂量分布。考虑到和以前工作^[3-4]的可比性,在上窗口奇口和偶口之间,放置了 12 个小球探测器作为快中子注量率和停堆剂量的计数器(见图 4a 和图 4b),其 11 和 12 号两个计数球位于真空室内部。计算使用的中子源对应了 400 MW 聚变中子功率。

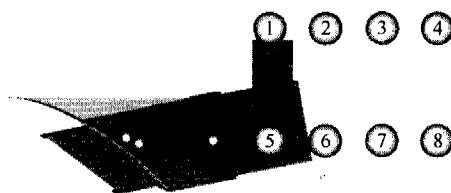


图 4a 上窗口周围的计数小球
Fig. 4a The tally spheres around upper port

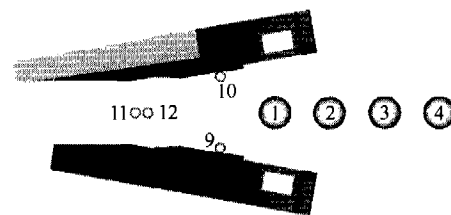


图 4b 上窗口周围的计数小球
Fig. 4b The tally spheres around upper port

3.1 快中子注量率(>1 MeV)

ITER 运行中对外界剂量贡献主要是快中子,在新上窗口模型的基础上计算得到计数点的快中子注量率和以前模型相关的结果比较见表 1。为了评估改变上窗口的模型设计可能带来的影响,ITER 核分析报告 NAG-211^[4]中已经给出一些近似等效分析结果,对应表 1 中上窗口旧模型 3 种方案分别是:

方案一:原模型;

方案二:两壁之间的水层中水的密度从天然降低至 3/8,以模拟水层从 8 cm 减薄至 3 cm 的效应;

方案三:在方案三的基础上去掉上下斜块。

表 1 上窗口新旧模型对应快中子注量率比较
(单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 The fast neutron flux comparison between the original and update upper port
(unit: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

计数球	上窗口 新模型	上窗口原模型		
		方案一	方案二	方案三
1	1.1×10^7	2.1×10^6	4.2×10^6	1.1×10^7
2	1.1×10^7	1.8×10^6	3.0×10^6	1.3×10^7
3	8.0×10^6	1.4×10^6	2.3×10^6	7.3×10^6
4	5.8×10^6	1.1×10^6	1.6×10^6	5.4×10^6
5	1.0×10^7	1.1×10^6	1.9×10^6	3.3×10^6
6	9.3×10^6	9.5×10^5	1.5×10^6	2.9×10^6
7	5.9×10^6	8.7×10^5	1.3×10^6	2.3×10^6
8	3.8×10^6	7.4×10^5	1.0×10^6	1.8×10^6
9	6.9×10^7	1.0×10^7	2.2×10^7	1.4×10^7
10	7.2×10^7	1.1×10^7	2.1×10^7	1.4×10^7
11	5.6×10^8	2.3×10^8	3.9×10^8	1.8×10^8
12	4.8×10^8	1.6×10^8	3.3×10^8	1.5×10^8

由于上窗口的侧壁水层从 8 cm 减薄为 3 cm, 并且窗口内腔的深度减小了 7 cm, 以至于窗口外侧的中子泄漏增大, 导致 1~4 号 4 个计数小球位置的快中子注量率升高。

而 5~8 号 4 个计数小球水平位置在上述 4 个小球下方, 除了上述的模型变化之外, 上窗口原先填塞了屏蔽材料的下斜块在新的设计中被去掉了, 这也是导致这 4 个位置快中子注量率升高的原因。

9 和 10 号计数球是位于上窗口和 TF 线圈两者之间的两个计数小球。中子的泄漏可能由于上窗口侧壁减薄后对 ECRH 插件和窗口内壁之间的屏蔽能力降低。

11 和 12 号计数球位于真空室内部, 而和原上窗口相比, 快中子注量率增大不到三倍。

对于 ITER 这样一个复杂的聚变实验装置, 聚变中子源是一个 D 形截面的轮胎形几何形状, 并且由于各向异性效应, 中子能量和空间分布也不尽相同, 在 MCNP 计算模型中通常采用两种形式的源描述, 一是采用 MCNP 程序自

身通用源的描述, 可将中子源描述成 5 层, 如图 5 所示, 能量分布也可使用 MCNP 程序自身提供的聚变中子谱, 空间几率分布按不同层由内向外分别为: 0.50、0.30、0.13、0.06 和 0.01, 这种形式称为“内置源描述”; 另一种是根据聚变装置自身的等离子体位形、等离子体温度和能量分布等特点得出的详细描述, 作为一个独立的矩阵文件, 和 MCNP 源程序一起编译, 形成一个适用于同一装置中子源的专门计算子程序, 称为“外置源描述”。前述快中子注量率计算都是基于“外置源描述”。图 6 给出两种不同源描述形式的快中子注量率计算结果, 两者之间的快中子注量率最大差异在 15% 以内。

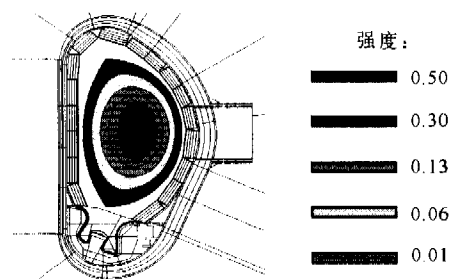


图 5 内置源空间强度分布

Fig. 5 The intensity of the internal neutron source

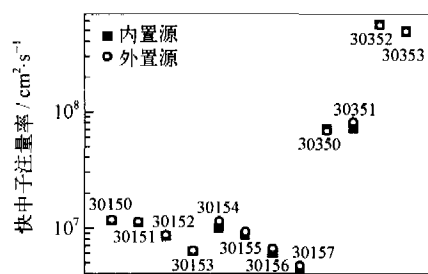


图 6 不同源描述的快中子注量率 (>1 MeV) 比较
Fig. 6 The fast neutron flux comparison between different neutron source descriptions of MCNP

3.2 PF-1 和 PF-2 线圈的核热

ITER 装置中有 6 个极向场 (poloidal field, 简称 PF) 线圈, 位于上窗口附近的编号分别为 PF-1 和 PF-2, 见图 7。由于上窗口的模型变化, 导致到达线圈处的中子泄漏增大, 线圈核热也相应改变, 其中上窗口附近的 PF-2 线圈的核热增大了好几倍 (表 2)。

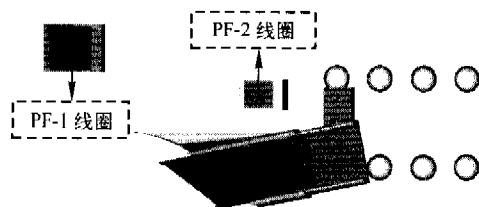


图7 位于上窗口附近的 PF-1 和 PF-2 线圈

Fig. 7 PF-1 and PF-2 coils near upper port

表2 上窗口附近 PF-1 和 PF-2 线圈的核热
(单位: MW · m⁻³)

Table 2 Nuclear heat of PF-1 & PF-2 coils
around upper port
(unit: MW · m⁻³)

线圈	新上窗口	原上窗口
PF-1	3.24	—
PF-2	21.1	4.275

3.3 停堆剂量

由于停堆一定的时间之后在上窗口附近会有人员进行维护维修,所以需要计算相应时间的停堆剂量,以评估屏蔽能力是否足够,在规定的时间内剂量降低到允许人员到达进行操作的程度。表3中给出了使用“一步法”^[7-9]算得的停堆 10⁶ s 后 ITER 上窗口附近停堆剂量率(ITER 的停堆剂量率的上限值是 100 μSv/h),显然上窗口模型的新设计对应的停堆剂量率升高了,这一点和 2.1 快中子注量率计算结果对应,因此需要针对性增加屏蔽才能达到允许人员维修操作的要求。

4 结论

计算表明,上窗口模型改动导致了快中子注量率、超导磁体线圈核热和停堆剂量率都有所增长。和上窗口原设计相比,新模型周围的快中子注量率、超导磁体的核热和停堆剂量都提高了好几倍。新上窗口的上部已经有足够的屏蔽能力,但是水平方向上的屏蔽仍然存在一些问题。由于 ITER 规定的停堆剂量设计值为 100 μSv/h,而目前上窗口的计算结果超出该限制,设计需要进一步改进。

表3 停堆 10⁶ s 时新旧模型对应剂量率比较
(单位: μSv · h⁻¹)

Table 3 dose rate at 10⁶ sec of the original and update upper port
(unit: μSv · h⁻¹)

计数球	上窗口新模型	上窗口原模型(方案三)
1	354	233
2	322	259
3	287	200
4	244	170
5	393	135
6	312	113
7	258	88
8	236	80
9	1 753	310
10	1 979	390
11	10 554	4 220
12	9 789	3 350

5 致谢

本文工作是在中国和 ITER 国际合作组织签署的核分析研究合同任务(ITA-73-01-CN)框架下进行的,在研究过程中得到了 ITER 国际合作组织核分析专家 H. Iida 博士(日本 Naka 联合工作中心)、G. Federici 博士(德国 Garching 联合工作中心)和其 CAD 设计室工程师的协助,特此致谢。

参考文献:

- [1] ITER-FEAT Outline Design Report, ITER Meeting, Tokyo, January 2000.
- [2] Iida H, Khripunov V, Petrizzi L, et al. Nuclear Analysis Report, NAG-201-01-06-17-FDR(2001).
- [3] Iida H. The Dose Distribution Analysis around the Revised upper Port, NAG-219—revised upper port, 05 July 2002.
- [4] Iida H, Dose Rate and Nuclear Heat Estimate around the Upper Ports—reducing wall thickness and removing chamfer, NAG-211-chmp, 21 December 2001.
- [5] 吴宜灿,李莹,卢磊,等. MCNP 粒子输运计算自动建模程序的发展[J],核科学与工程,2005,25(4).
- [6] Briesmeister J F (Ed.). MCNP4C General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Los Alamos National Labor-

- ratory, LA-13709-M, 2000.
- [7] Iida H, Davide V, Romano P, et al. Radiation Shielding for ITER to Allow for Hands-on Maintenance Inside the Cryostat (Methodology for Estimating Shutdown Dose Rate in a Complex Geometry), *Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 1*, p. 235-242 (March 2000).
- [8] Davide V, Iida H, Plenteda R, et al. Proposal of Shutdown Dose Estimation Method by Monte Carlo Code.
- [9] Petrizzi L, Iida H, Valenza D, et al. Improvement and benchmarking of the new shutdown dose estimation method by Monte Carlo code.
- [10] Chen Y, Fischer U. Rigorous MCNP based shutdown dose rate calculations; computational scheme, verification calculations and application to ITER, *Fusion Engineering and Design* 63-64 (2002); 107-114.