

中国 ITER 固态实验包层模块 活化特性计算分析

韩静茹¹, 陈义学¹, 马续波¹, 杨寿海¹, R. A. Forrest²

(1. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京 102206;

2. EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Centre, Abingdon,
Oxfordshire OX14 3DB, UK)

摘要: 基于中国 ITER 氦冷固态实验包层 (HCSB-TBM) 3×6 模块化结构设计, 对其活化特性进行了计算分析。利用蒙特卡罗程序 MCNP 及数据库 FENDL/2 进行三维中子输运计算, 在此基础上, 使用欧洲活化分析系统 EASY-2007 进行了详细的活化计算。结果表明, 刚停堆时, 测试包层模块 (TBM) 总活度为 1.29×10^{16} Bq, 总余热为 2.46 kW, 且均主要受低活化马氏体钢 Eurofer 材料控制。活度和余热值均在 TBM 安全设计范围内, 且不会对环境造成显著影响。同时, 根据计算的接触剂量率可知, TBM 中的活化材料均能采取远程操作实现循环再利用。活化计算结果表明, 当前的 HCSB-TBM 设计中子活化角度满足 ITER 安全设计需求。

关键词: 活化; 氦冷固态实验包层模块; MCNP 程序; FISPACT 程序

中图分类号: TL627

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)05-0389-06

Activation Analysis of Chinese ITER Helium Cooled Solid Breeder Test Blanket Module

HAN Jing-ru¹, CHEN Yi-xue¹, MA Xu-bo¹, YANG Shou-hai¹, R. A. Forrest²

(1. *Department of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

2. *Culham Science Centre, EURATOM/UKAEA Fusion Association, Abingdon, Oxfordshire OX14 3DB, UK*)

Abstract: Based on the Chinese ITER helium cooled solid breeder (CH-HCSB) test blanket module (TBM) of the 3×6 sub-modules options, the activation characteristics of the TBM were calculated. Three-dimensional neutronic calculations were performed using the Monte-Carlo code MCNP and the nuclear data library FENDL/2. Furthermore, the activation calculations of HCSB-TBM were carried out with the European activation system EASY-2007. At shutdown the total activity is 1.29×10^{16} Bq, and the

收稿日期: 2008-04-24; 修回日期: 2008-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10705011); 教育部科学技术研究重点资助项目(107029); 北京市科技新星计划资助项目(2007B058); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0720)

作者简介: 韩静茹(1983—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

total afterheat is 2.46 kW. They are both dominated by the Eurofer steel. The activity and afterheat are both in the safe range of TBM design, and will not have a great impact on the environment. Meanwhile, on basis of the calculated contact dose rate, the activated materials can be re-used following the remote handling recycling options. The activation results demonstrate that the current HCSB-TBM design can satisfy the ITER safety design requirements from the activation point of view.

Key words: activation; helium cooled solid breeder test blanket module; MCNP code; FISPACT code

国际热核实验堆(ITER)^[1]计划的目标是为未来聚变示范堆(DEMO)的设计和建造提供技术和数据基础。其中的一项重要任务是试验氦增殖包层的关键工艺及材料。因此,在位于ITER水平位置的实验窗口中,设定3个窗口来放置各国设计的增殖实验包层模块(TBM)进行实验研究^[2]。在运行过程中,材料将受到来自等离子体区D-T聚变产生的中子辐照,材料被活化,并可能使材料的性能发生改变或失效。通常,停堆后工作人员需考虑通过进入堆内或使用远程遥控操作方式对聚变堆系统进行维护和修理,因而,停堆剂量率的分析显得尤为重要。同时,停堆初期的衰变余热也是聚变堆热工安全分析的重要参数。另外,辐照后的活化核材料的回收和处理也是重要的研究方向。

中国的固态实验包层模块(CH-HCSB-TBM)设计始于2004年,经两年多的设计,已完成氦冷却固态增殖剂实验包层模块的初步设计工作^[3]。本工作就中国ITER氦冷 Li_4SiO_4 固体实验包层 3×6 模块设计,利用国际通用的粒子输运程序MCNP^[4]和最新的欧洲活化计算分析系统EASY-2007^[5],在精确的三维模型基础上对CH-HCSB-TBM中的3种主要组成材料(Eurofer, Be, Li_4SiO_4)的活化特性进行计算和分析。

1 计算模型、程序及数据库

CH-HCSB-TBM放在空间为1/2的ITER实验窗口的嵌套内,由第1壁(FW)、上(下)盖板、增殖子模块、后板、隔板、支撑板等主要部件组成(图1)。TBM采用模块化设计,根据结构框架限制,子模块在包层内部按 3×6 ^[6]排列。增殖材料包裹在子模块中,由冷却板(CP)将其分隔为不同的增殖区,冷却剂为高压氦气。氦

增殖区为以直径0.5~1 mm的 Li_4SiO_4 小球填充的增殖球床,而以直径1 mm的铍珠填充的铍球床作为中子增殖区(图2)。CH-HCSB-TBM结构材料采用欧洲低活化马氏体钢Eurofer^[7]。

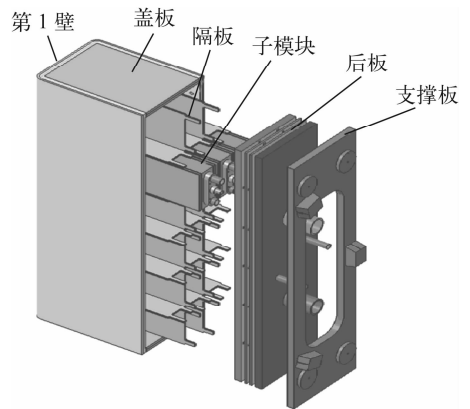


图1 CH-HCSB-TBM结构示意图

Fig.1 Scheme of 3-D CH-HCSB-TBM model

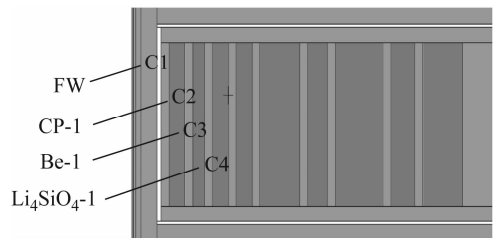


图2 子模块S8水平(x,y)剖面图

Fig.2 Horizontal cross-section of sub-module 8 (x,y) in TBM

本工作计算所使用的CH-HCSB-TBM三维几何模型如上所述。用MCNP程序计算了活化计算所需的中子能谱。图3示出了Eurofer、Be和 Li_4SiO_4 3种材料的中子注量率分布情况。

本工作采用了欧洲最新的活化系统EASY-

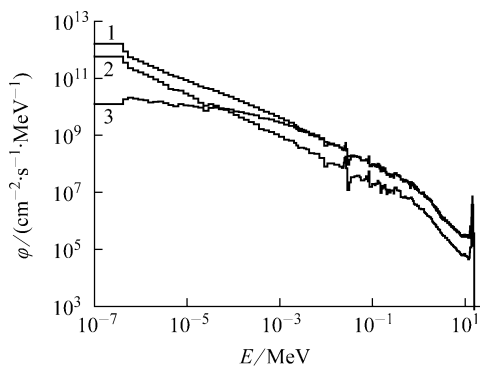


图3 TBM中3种不同材料的中子能谱

Fig. 3 Neutron spectra of three different materials in TBM

1——Be; 2——Eurofer; 3——Li₄SiO₄

2007,它由活化计算程序 FISPACT、核数据库 EAF 和说明文件组成。EASY-2007 与以前版本相比,包含了更多的中子诱发反应,增加到 65 565 个。中子能量上限已增加到 60 MeV,

这使得 EASY 不仅可计算聚变、裂变装置材料的活化情况,且可用于高能中子材料测试装置的材料活化计算等。除此之外,EASY-2007 还可计算加速器中由氘核或质子引起的材料的活化反应。

本工作中,MCNP 计算获得的中子能谱作为欧洲活化计算程序 FISPACT-2007^[8]的输入之一,计算了 CH-HCSB-TBM 中不同材料的活化特性,包括活度、衰变余热和停堆接触剂量率。FISPACT-2007 程序使用的配套活化数据库为 EAF-2007^[9],它包含计算所需的核数据截面及衰变参数等数据。除上述中子能谱外,活化计算的输入文件还需包层各材料的元素组成和辐照历史条件。材料元素组成(质量分数)列于表 1。辐照条件采用 ITER 运行的一种典型辐照情况 ITER M-DRG1,在假设 ITER 聚变功率 500 MW、连续照射 20 a 条件下进行活化计算。具体照射情况列于表 2。

表 1 CH-HCSB-TBM 包层材料元素组成

Table 1 Elemental composition of materials in CH-HCSB-TBM

				%							
元素	Eurofer	Be	Li ₄ SiO ₄	元素	Eurofer	Be	Li ₄ SiO ₄	元素	Eurofer	Be	Li ₄ SiO ₄
Fe	88.983	0.09	0.010 6	Mn	0.4		0.000 25	Al	0.01	0.04	0.006
Li			22.345	P	0.005			Co	0.005	0.001	0.000 4
O	0.01	0.147 13	53.302	S	0.005			Cu	0.005		0.000 3
Be		99.583		Cr	9		0.003	Zr			0.006 6
C	0.105		0.113	Ni	0.005		0.001	Zn			0.000 6
Ca			0.003 7	Mo	0.005			Sc		0.005	
K			0.004 1	V	0.2			Ta	0.07		
Mg		0.03	0.002	Nb	0.001			Ti	0.01		0.020 6
Na			0.002	B	0.001			W	1.1		
Si	0.05	0.02	24.179	N	0.03			U		0.01	

表 2 辐照历史条件

Table 2 Irradiation history of considered ITER M-DRG1 operation scenario

时间	第 1 壁的平均中子积分通量/(MW·a·m ⁻²)	平均可利用率	时间	第 1 壁的平均中子积分通量/(MW·a·m ⁻²)	平均可利用率	时间	第 1 壁的平均中子积分通量/(MW·a·m ⁻²)	平均可利用率
1~4 a	0.0	0.0	8 a	0.020	0.036	11~20 a 减 6 d	0.208	0.036
5 a	0.006	0.010 7	9 a	0.024	0.043	20 a 的最后 6 d	0.002	0.25
6 a	0.008	0.014 3	10 a 减 6 d	0.022	0.039	11~20 a	0.210	0.030 7
7 a	0.012	0.021	10 a 的最后 6 d	0.002	0.25	1~20 a	0.306	0.027

2 计算结果和分析

2.1 中子能谱

TBM 中 3 种不同材料的中子能谱示于图 3。中子能谱直接影响材料的活化水平。工作中的中子能谱采用国际上通用的粒子输运 MC 模拟程序 MCNP 和国际原子能机构 IAEA 发布的聚变评价核数据库 FENDL/2^[10]、利用标准的 VITAMIN-J 175 能群结构计算得到。此次计算跟踪模拟了 1.54×10^7 个粒子的运动,使得计算结果统计误差控制在 1% 以内。

2.2 活度

经高能中子辐照, TBM 中的结构材料 Eurofer、中子倍增材料 Be 和氚增殖材料 Li_4SiO_4 均存在严重的活化反应,可能会使材料性能发生变化或失效,同时也会产生许多放射性物质。因此,活度计算对辐照后的材料特性及对环境的影响的评价很有必要。

计算结果表明,聚变堆停堆后 0 时刻, TBM 的总活度为 1.29×10^{16} Bq,其中, Eurofer 材料的活度为 8.76×10^{15} Bq,约占总活度的 67.9%, Li_4SiO_4 和 Be 材料的活度分别为 2.96×10^{15} 和 1.17×10^{15} Bq,贡献比例分别为 22.9% 和 9.1%。

CH-HCSB-TBM 活度随冷却时间的变化示于图 4。在停堆 1 min~0.5 a 间, TBM 总活度主要受 Eurofer 材料影响。此时, Eurofer 的活度主要受核素 ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2.582$ h) 和 ^{55}Fe ($T_{1/2} = 2.735$ a) 支配,其主要生成途径分别为 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 、 $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$ 。在停堆 3~200 a 间, TBM 总活度主要受 Li_4SiO_4 影响,主要贡献核素是 ^3H ($T_{1/2} = 12.33$ a),其主要生成途径为 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 。停堆 200~ 1×10^6 a, TBM 总活度又主要由 Eurofer 控制,这主要由核素 ^{14}C ($T_{1/2} = 5.67 \times 10^3$ a) 和 ^{53}Mn ($T_{1/2} = 3.68 \times 10^6$ a) 支配。 ^{14}C 和 ^{53}Mn 主要生成途径分别为 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 和 $^{54}\text{Fe}(n, d)^{53}\text{Mn}$ 。

TBM 总活度在停堆冷却初期变化平缓,停堆 1 a 后的总活度为 3.89×10^{15} Bq,停堆 15 a 后的总活度为 1.2×10^{15} Bq,总活度此时下降约 1 个数量级。在此之后, TBM 总活度开始迅速下降,在停堆 100 a 时,总活度已下降到 9.78×10^{12} Bq,这个量对环境不会造成突出影响。

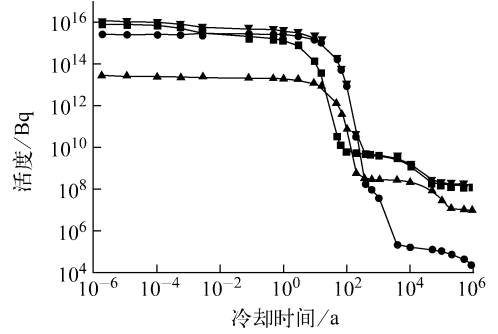


图 4 TBM 总活度和各材料的贡献

Fig. 4 Total activity generated in TBM and contribution from each material

■—Eurofer; ●— Li_4SiO_4 ; ▲—Be; ▼—总活度

2.3 衰变余热

余热来源于放射性核素的衰变热。该热量相对于 TBM 稳定运行时的功率非常小,但它是聚变堆热工安全的一重要参数,如果不能有效地处理好余热,它将导致 TBM 内温度升高,可能会给 TBM 带来安全隐患。因此,需对停堆后活化材料的余热进行计算分析。

结果表明,停堆后 0 时刻, TBM 的总余热为 2.46 kW,其中, 1.99 kW 分布在 Eurofer 材料中,占总余热的 80.9%, Li_4SiO_4 和 Be 材料中的余热分别为 0.185 和 0.288 kW,在总余热中的份额分别为 7.5% 和 11.7%。在 TBM 设计中,余热可依赖冷却剂或其它系统带出。

CH-HCSB-TBM 的衰变余热随冷却时间的变化示于图 5。随着冷却时间的变化, TBM 总余热依次受 Eurofer、 Li_4SiO_4 和 Be 支配,并随冷却时间的增加迅速衰减。在停堆 3 a 内, TBM 总余热主要受 Eurofer 影响,主导核素为 ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2.582$ h) 和 ^{55}Fe ($T_{1/2} = 2.735$ a)。停堆 10~200 a, TBM 总余热主要受 Li_4SiO_4 支配,主导核素为 ^3H ($T_{1/2} = 12.33$ a)。停堆 200~ 1×10^6 a, TBM 总余热主要由 Be 材料贡献,主要来自核素 ^{239}Pu ($T_{1/2} = 2.41 \times 10^4$ a), ^{239}Pu 主要来自 Be 材料中 0.01% 铀杂质,主要生成途径为 $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U}(\beta^-)^{239}\text{Np}(\beta^-)^{239}\text{Pu}$ 。

TBM 总余热随停堆时间有明显的变化,在停堆 1 a 后,总余热即下降为 1.9×10^{-2} kW,总余热到此时下降约两个数量级。停堆 10 a 后,的总余热为 1.96×10^{-3} kW,在停堆 100 a

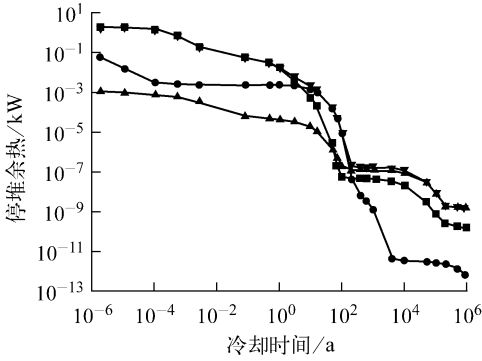


图 5 TBM 总余热和各材料的贡献

Fig. 5 Total afterheat generated in TBM and contribution from each material

■—Eurofer; ●—Li₄SiO₄; ▲—Be; ▼—总余热

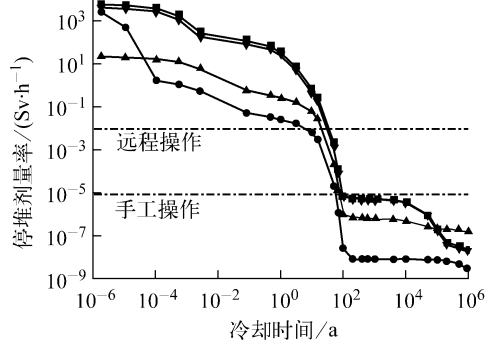


图 6 典型栅元的停堆接触剂量率

Fig. 6 Contact dose rate of different materials from typical cells in TBM

■—FW; ●—Li₄SiO₄-1; ▲—Be-1; ▼—CP-1

时,总余热已下降到 9.13×10^{-6} kW,此值已非常小,不会对 TBM 安全问题带来影响。

2.4 接触剂量率

只要距等离子体最近的包层部件区的剂量率不超过限值,那么,TBM 中其余区域则处在安全状态。所以,对于 TBM 材料各区停堆剂量率的计算分析,选取了 4 个栅元作为典型区域(图 2)。4 个典型栅元包括第 1 壁和子模块 8 中的 3 个栅元。

图 6 示出 TBM 中 4 个典型栅元在停堆后 10^6 a 内的剂量率水平曲线。图中,10 mSv/h 和 $10 \mu\text{Sv/h}$ 分别为远程操作再循环和手工操作再循环剂量率水平标准(简称为远程操作和手工操作)。可看出:栅元材料欲达到远程操作,FW、Be、Li₄SiO₄ 和 CP 的冷却时间分别约为 50、20、15 和 40 a。另一方面,Be 和 Li₄SiO₄ 分别冷却 100 和 70 a 左右可达到手工操作水平,但对于 FW 和 CP,达到手工操作则需 10^4 a。

在停堆到各材料达到远程操作的约 50 a 间,各栅元材料的接触剂量率主要来自核素 ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.271$ a),其主要生成途径是核反应 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}^m(\text{IT})^{60}\text{Co}$ 。因此,在不影响材料性能的基础上,可通过减少各材料中杂质 Co 的含量来缩短材料达到远程操作所需的冷却时间。

随后,欲达到手动操作水平,对于 FW 和 CP,其接触剂量率主要来自核素 ^{94}Nb ($T_{1/2} = 2 \times 10^4$ a) 的贡献, ^{94}Nb 主要生成途径为 $^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}$ 、 $^{94}\text{Mo}(n, p)^{94}\text{Nb}$ 、 $^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}^m(\text{IT})^{94}\text{Nb}$ 、

$^{94}\text{Mo}(n, p)^{94}\text{Nb}^m(\text{IT})^{94}\text{Nb}$ 。 ^{94}Nb 的接触剂量率主要由 $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U}(\beta^-)^{239}\text{Np}(\beta^-)^{239}\text{Pu}$ 生成的 ^{239}Pu ($T_{1/2} = 2.41 \times 10^4$ a) 支配,而 Li₄SiO₄ 的接触剂量率主要受核素 ^{26}Al ($T_{1/2} = 7.17 \times 10^5$ a) 支配,其主要生成路径为 $^{27}\text{Al}(n, 2n)^{26}\text{Al}$,此反应的阈能为 13.5 MeV,在低能中子区不会产生长寿命核素 ^{26}Al 。

3 结论

根据 CH-HCSB-TBM 3×6 设计方案,在假设 ITER 聚变功率为 500 MW 情况下,采用国际通用的 Monte-Carlo 粒子运输模拟程序 MCNP 计算出所需材料栅元的中子能谱。在此基础上,应用欧洲活化程序 FISPACT-2007 对 TBM 的活化特性进行了计算分析。计算结果表明,TBM 内不同材料经中子辐照后的活度和余热在停堆初期均主要受结构材料 Eurofer 影响。在停堆初期,TBM 总活度、总余热分别为 1.29×10^{16} Bq 和 2.46 kW。在停堆几年到十几年后,这些值衰减很快,符合安全限值,不会对环境安全带来显著影响。TBM 内各材料的接触剂量率经 50~100 a 停堆冷却后,均低于远程操作回收剂量率限值 10 mSv/h,此冷却期间各材料的接触剂量率主要来自核素 ^{60}Co 。CH-HCSB-TBM 活化特性计算结果表明,此设计满足材料需求和 ITER 安全设计需求,不存在突出的材料活化安全问题。另外,TBM 的设计还处在不断修改和完善过程中,活化计算对后面许多其它系统的设计影响很大,需不断优化。

本研究中,核工业西南物理研究院冯开明研究员给与了大力支持及指导,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] ITER Home Page. The ITER project[G/OL]. [S. 1.]: [s. n.], 2005[2008-04-24]. http://www.iter.org/a/index_nav_1.htm.
- [2] GIANCARLI L, CHUYANOV V, ABDU M, et al. Breeding blanket modules testing in ITER; An international program on the way to DEMO [J]. *Fusion Eng Des*, 2006, 81: 393-405.
- [3] FENG K M, PAN C H, ZHANG G S, et al. Preliminary design for a China ITER test blanket module [J]. *Fusion Eng Des*, 2006, 81: 1 219-1 224.
- [4] BRIESMEISTER J F. MCNP: A general Monte Carlo *N*-particle transport code, version 4C, LA-13709-M[R]. USA: LANL, 2000.
- [5] FORREST R A. The European activation system; EASY-2007 overview, UKAEA FUS 534 [R]. UK: UKAEA Fusion, 2007.
- [6] ZHANG Guoshu, FENG Kaiming, LI Zengqiang, et al. Recent neutronics analysis for a china ITER HCSB NT-TBM [C]// 21st IAEA Fusion Energy Conference. Chengdu, China: SWIP, 2006.
- [7] FISCHER U, TSIGE-TAMIRAT H. Activation characteristics of a solid breeder blanket for a fusion power demonstration reactor[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, 307-311: 798-802.
- [8] FORREST R A. FISPACT-2007; User manual, UKAEA FUS 534 [R]. UK: UKAEA Fusion, 2007.
- [9] FORREST R A, KOPECKY J, SUBLET J C. The European activation file: EAF-2007 cross section library, UKAEA FUS 535 [R]. UK: UKAEA Fusion, 2007.
- [10] WIENKE H, HERMAN M. FENDL/MG-2.0 and FENDL/MC-2.0, the processed cross-section libraries for neutron-photon transport calculations, version 1 [R]. Vienna, Austria: Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency, 1998.