

# ITER 中国液态锂铅实验包层模块 结构热应力数值模拟

陈红丽, 吴宜灿, 柏云清

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 使用有限元程序对中国向国际热核实验堆 ITER 实验包层工作组提交的双功能锂铅实验包层模块 (DFLL-TBM) 的两种结构设计即双冷 LiPb 包层 DLL 和单冷准静态 LiPb 包层 SLL 进行热应力数值模拟, 在包层结构设计、热工水力学设计和中子学计算基础上, 给出包层结构温度场和应力场分布, 依据 ITER 高温结构设计标准, 进一步对包层高温部件进行力学性能分析。根据这些模拟结果, 分析两种结构基本设计方案的合理性和可行性, 并作为进一步优化分析的基础。

**关键词:** ITER; DFLL-TBM; 温度场; 应力场

**中图分类号:** TL64<sup>+</sup>2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0258-0918(2006)01-0088-04

## Thermomechanical analysis of the DFLL test blanket module for ITER

CHEN Hong-li, WU Yi-can, BAI Yun-qing

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

**Abstract:** The finite element code is used to simulate two kinds of blanket design structure, which are SLL (Quasi-Static Lithium Lead) and DLL (Dual-cooled Lithium Lead) blanket concepts for the Dual Functional Lithium Lead -Test Blanket Module (DFLL-TBM) submitted to the ITER test blanket working group. The temperature and stress distributions have been presented for the two kinds of blanket structure on the basis of the structural design, thermal-hydraulic design and neutronics analysis. Also the mechanical performance is presented for the high temperature component of blanket structure according to the ITER Structural Design Criterial (ISDC). The rationality and feasibility of the two kinds of blanket structure design of DFLL-TBM have been analyzed based on the above results which also acted as the theoretical base for further optimized analysis.

**Key words:** ITER; DFLL-TBM; temperature distribution; stress distribution

**收稿日期:** 2005-12-02; **修回日期:** 2005-12-12

**基金项目:** 本工作是在 ITER-TBWG 国际合作框架下进行, 得到国家“973”计划支持

**作者简介:** 陈红丽 (1968—), 女, 安徽人, 副教授, 现为中科院等离子体物理研究所博士生, 从事聚变反应堆热工与结构分析研究

国际热核试验堆 (ITER; International Thermonuclear Experimental Reactor) 是一个即将建造的可自持燃烧 (即“点火”) 的托卡马克聚变实验堆<sup>[1]</sup>, 主要是为了验证聚变反应堆的工程可行性。ITER 的实验包层工作组 (TBWG-Test Blanket Working Group) 计划在 ITER 运行后期安装实验包层模块 (TBM; Test Blanket Module), 置于中子流强最高、热流密度最大的 ITER 装置赤道面窗口, 来模拟和测试与未来聚变发电堆相关的材料和技术。

DFLL-TBM (Dual Functional Lithium Lead -Test Blanket Module) 是中国向 ITER 实验包层工作组提交的并将在 ITER 中进行测试的双功能锂铅实验包层模块, 其作用主要是演示和验证聚变发电反应堆 FDS-II 双冷和单冷锂铅包层相关设计和技术<sup>[2]</sup>和部分演示聚变驱动次临界混合堆 FDS-I 双冷嬗变包层的相关技术<sup>[3]</sup>。类似于 FDS-II 包层结构概念设计, TBM 包层主体结构材料选取目前技术相对成熟的低活化铁素体/马氏体 (RAFM) 钢 (如中科院等离子体所正在主导研发的中国 CLAM 钢)<sup>[4]</sup>, 氚增殖剂则选用化学特性相对不活泼的锂铅共晶体。DFLL-TBM 有两种冷却设计方案, 即高压氦气冷却、准静态锂铅 (SLL; Quasi-Static Lithium Lead) 包层概念和高压氦气冷却结构而液态金属锂铅自冷 (DLL; Dual-cooled Lithium Lead) 包层概念, 其中 DLL-TBM 包层考虑使用热与电绝缘流道插件, 可提高冷却剂出口温度导致经济性的提高而作为首选目标概念, 而 SLL-TBM 包层 LiPb 回路不考虑流道插件, LiPb 流动速度缓慢, 其作用仅用于提氚, 有较小的 MHD 效应问题和腐蚀问题是一种技术上更容易实现的候选方案。

利用商用有限元程序 ANSYS 对 DFLL-TBM 的两种结构设计方案 DLL-TBM 和 SLL-TBM 进行热力学分析, 分析两种结构基本设计方案的合理性和可行性, 并作为进一步优化分析的基础。

## 1 DLL/SLLTBM 包层结构分析模型

图 1 为 DFLL-TBM 三维结构计算模型, 其中 DLL-TBM 考虑流道插件。由于包层的

结构环向对称, 因此选取结构的一半进行模拟, 氦气联箱部分只考虑背板 1 结构。包层第一壁氦气为 U 形相向流动, 考虑氦气流道分布的周期性和对称性, 极向高度选取 FW 的 4 个氦气流道。模型主要是用来模拟计算 DLL-TBM 和 SLL-TBM 结构设计是否满足结构材料温度和应力标准。

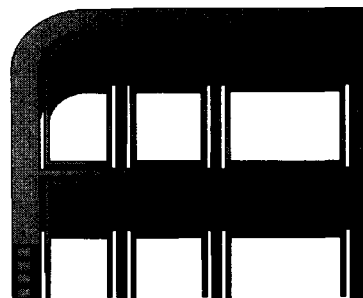


图 1 DFLL-TBM 三维计算模型  
Fig. 1 3-D model of DFLL-TBM

约束条件有以下 7 个方面:

1) 根据 ITER 对 TBM 参数要求, TBM 第一壁表面平均热流密度为  $0.3 \text{ MW/m}^2$ , 10% 表面热流密度为  $0.5 \text{ MW/m}^2$ , 考虑对 FW 最严酷的影响, 结构分析计算时采用最大表面热流  $0.5 \text{ MW/m}^2$ 。

2) 由于 CLAM 钢正处于研究阶段, 参照与其性能相似的 F82H 的参数<sup>[5]</sup>, 其最大工作温度上限约为  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ , 该温度时结构最大 Von Mises 应力不超过  $3S_m$ , 与液态金属 LiPb 相容温度取为  $480 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3) DLL-TBM LiPb 增殖区核热完全依靠自冷排热, 因此假设氦气携带 FW、隔板、插件 (计算时以碳化硅为参考材料) 及插件与结构缝隙中 LiPb 核热; 相应的各区功率密度以及热工水力学参数见文献[6]。

4) 对 SLL-TBM 而言, 液态增殖区 LiPb 核热由 FW 和隔板氦气携带, 为了考查 LiPb 这部分核热对 FW 以及隔板的影响, 假设两种极限工况, 工况 I 假设和 FW 相邻流道内的 LiPb 核热 100% 加载在 FW 结构上, 工况 II 假设 LiPb 核热 100% 加载在隔板结构上, 其中 LiPb 核热以表面热流的形式加载在 FW 和隔板上。

5) 对 DLL-TBM 包层结构进行热力学分析时,计算模型应取在靠近第一增殖区 LiPb 流道下部转弯处,该处 LiPb 温度最大约 650 °C<sup>[6]</sup>,对 FW 结构温度影响最大。

6) 而 SLL-TBM 计算模型应取在模块上部,对应环极向隔板和径极向隔板氦气温度最大位置,此处氦气携带 LiPb 核热能力最差。

7) 对 DLL/SLL-TBM 进行应力分析时,背板以径向进行约束,由于模型只选择一半,因此环向施加对称。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 结构温度与应力分析

DLL-TBM 三维模型结构温度场、应力场分布如图 2~3,结构最大温度为 546 °C 出现在第一壁面向等离子区域,结构最大 Von Mises 应力出现在 FW 流道转弯处为 340 MPa,该处对应温度约为 500 °C,该温度下允许应力极限为 417 MPa。SLL-TBM 在假设工况 I、II 下对应的温度场分布见图 4~5,其结构最大温度分别为 547 °C、519 °C,对应的应力场分布见图 6~7,最大 Von Mises 应力分别为 365 MPa(小于对应温度 346 °C 下的允许应力极限 486 MPa)和 410 MPa(略大于对应温度 519 °C 下的允许应力极限 402 MPa),主要是由于工况 II 下的极限假设造成热量的过于集中,过大的温度梯度导致应力超标。实际 LiPb 核热应由 FW 和隔板氦气同时携带,相应的实际应力会降低在材料允许范围之内,如果进一步在 LiPb 流道增加氦气隔板,可以使最大应力再进一步降低。

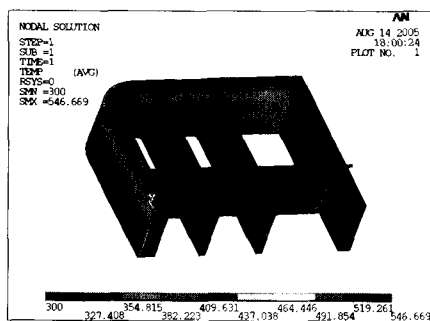


图 2 DLL-TBM 结构温度分布  
Fig.2 Temperature distribution of the DLL-TBM structure

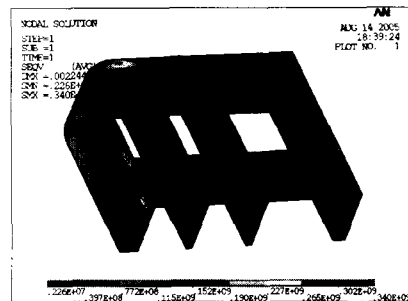


图 3 DLL-TBM 结构应力分布  
Fig.3 Von mises stress distribution of the DLL-TBM structure

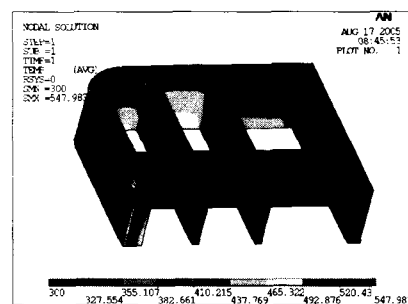


图 4 SLL-TBM 结构温度分布(工况 I)  
Fig.4 Temperature distribution of the SLL-TBM structure(scenario I)

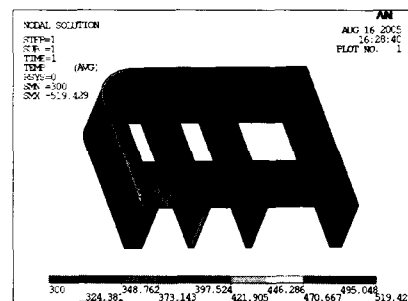


图 5 SLL-TBM 结构温度分布(工况 II)  
Fig.5 Temperature distribution of the SLL-TBM structure(scenario II)

### 2.2 高温结构设计标准

#### 2.2.1 蠕变损伤限制

根据 ITER 高温结构设计标准(ISDC)<sup>[7]</sup>,为了抵抗材料在高温环境下的蠕变损伤,薄膜应力( $P_m$  and  $P_L$ )和弯曲应力( $P_b$ )必须满足以下限制。

其中, $S_m$ 为不随时间变化的第一应力允许

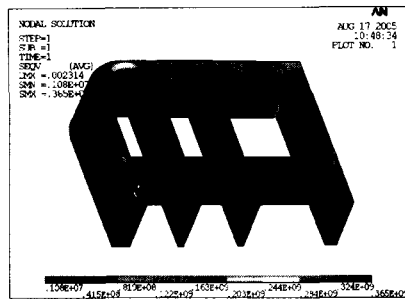


图 6 SLL-TBM 结构应力分布(工况 I)  
Fig. 6 Von Mises stress distribution of the SLL-TBM structure(scenario I)

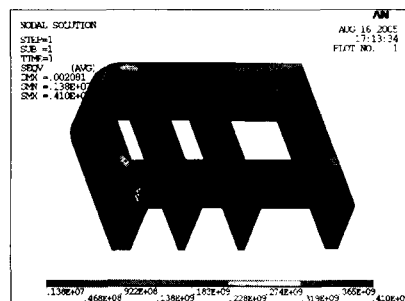


图 7 SLL-TBM 结构应力分布(工况 II)  
Fig. 7 Von Mises stress distribution of the SLL-TBM structure(scenario II)

值,  $S_t$  为随时间变化的第一应力允许值,  $K_t = (K + 1)/2$ ,  $K$  为结构弯曲因子, 对 DFLL-TBM 而言,  $K = 1.27$ 。

$$P_m \leq \begin{cases} S_m(T_m), T_m \text{ 为平均温度} \\ S_t(T_m, t), T_m \text{ 为平均温度}; t \text{ 为设计寿命} \end{cases}$$

$$P_L + P_b \leq K S_m,$$

$$P_L + \frac{P_b}{K_t} \leq S_t$$

假设  $t = 10\ 000\ \text{h}$ ,  $S_m$  和  $S_t$  随温度变化曲线参考材料 F82H 见文献[5], 分析结果见图 1, 对 TBM 的 FW 高温部件, 第一薄膜应力和弯曲应力是满足高温下蠕变损伤限制要求的。

### 2.2.2 周期蠕变-棘轮效应限制

为了防止周期蠕变-棘轮效应变形, ITER 高温结构设计标准又提出一个简单又保守的设计规则, 即  $3S_m$  规则或者 Bree-diagram 规则[8]。这些规则考虑了第一应力 ( $P$ ) 以及第二应力 ( $Q$ ) 的影响。

$3S_m$  规则:

$$\max(\overline{P_L + P_b}) + \Delta[\overline{P} + \overline{Q}]_{\max} \leq 3S_m(T_m, \Phi t_m)$$

其中,  $\Delta[\overline{P} + \overline{Q}]_{\max}$  为周期内第一应力以及第二应力的最大变化范围

Bree-Diagram 规则:

$$X = \frac{\overline{P_m}}{S_y} \text{ 或 } X = \frac{P_L + \frac{P_b}{K}}{S_y}$$

$$Y = \frac{\Delta[\overline{P} + \overline{Q}]}{S_y}$$

其中,  $S_y$  为平均最小的屈服强度。

表 1 温度和第一应力

Table 1 Temperature and primary stresses

Location	Temperature/°C				stresses					
	Average	max.	$P_m$	$P_b$	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$	$P_L + P_t/K_t$	$S_m/\text{MPa}$	$S_t/\text{MPa}$	10 000 h
FW	470	546	40	72	112	292	103	144	160	

表 2 第一应力以及第二应力

Table 2 Primary stress and secondary stresses

Location	Average Temperature/°C	Q	$S_y/\text{MPa}$	$X = (P_L + P_b/K_t)/S_y$	$Y = (\Delta P + \Delta Q)/S_y$
FW	470	180	420	0.25	0.70

$$Y \leq \frac{1}{X} \text{ for } 0 \leq X \leq 0.5$$

$$Y \leq 4(1 - X) \text{ for } 0.5 \leq X \leq 1.0$$

$$X + Y \leq 1$$

分析结果见图 2, 对 TBM 的 FW 高温部件, 第一应力以及第二应力是能够阻止高温下蠕变-棘轮效应变形的。

(下转第 96 页, continued on page 96)

其结构功能设计合理,结构简单,易于制造加工,可靠性高,易于演变出系列实验模块,能满足 DFLL-TBM 双功能实验策略。一个可行的 DLL 装配加工工艺已提出, HIP 等焊接加工技术能够满足 DFLL-TBM 零部件加工以及整个模块的装配。

当然,对 DFLL-TBM 结构(FW、隔板流道与布置、机械连接等)需做进一步优化,详细设计、工艺验证下一步将陆续进行,同时也要开展其他的制造工艺技术研究(比如精确铸造等),以最低制造成本保证 DFLL-TBM 制造质量。

#### 参考文献:

- [1] 吴宜灿,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.
- [2] 刘松林,等. 聚变发电反应堆双冷液态锂铅包层模块结构设计与分析[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1):91-96.
- [3] The 2005 TBWG Final report. EU report to the ITER Test Blanket Working Group, ftp.itereu.de, 2005,9.

(上接第 91 页, continued from page 91)

### 3 总结

1) 本文利用商用有限元程序 ANSYS 完成 ITER 实验包层 DFLL-TBM 结构温度场与应力场数值模拟,结果显示, TBM 两种基本结构设计能够满足材料温度、应力限制要求。

2) 根据 ITER 高温结构设计标准,对 DFLL-TBM 的 FW 高温部件进行热力学性能分析,结果显示, FW 第一应力以及第二应力能够满足高温下蠕变损伤限制要求以及周期蠕变-棘轮效应限制要求。

#### 参考文献:

- [1] ITER; Study of Options for the Reduced Technical Objectives/Reduced Cost (RTO/RC) ITER, report presented at the ITER Council Meeting No. 15, March 10-11, 1999. Also see ITER-FEAT Outline Design Report, ITER Meeting, Tokyo, January 2000.

- [4] Vetter J E, EU (Chair). Report from the TBWG for the Period of Extension of the EDA(2001).
- [5] Farabolini W, et al. Progress of HCLL-TBM design. ftp.itereu.de. TBWG-14 Meeting Naka, December 15-17, 2004.
- [6] Wong C P C, et al. US DCLL TBM. ftp.itereu.de. SWG Meeting Tokyo, May 30-31, 2005.
- [7] 吴宜灿,等. ITER 中国液态锂铅实验包层模块设计与实验策略[J]. 核科学与工程, 2005, 25(4):347-360.
- [8] 汪卫华,等. ITER 中国液态锂铅实验包层模块热工水力学设计与分析[J]. 核科学与工程.
- [9] 陈红丽,等. ITER 中国液态锂铅实验包层模块结构热应力数值模拟[J]. 核科学与工程, 2006, 26(1):88-91.
- [10] Cardella A, et al. The manufacturing technologies of the European breeding blankets, Journal of Nuclear Material, 2004, 133-140: 329-333.
- [11] Ioki K, et al. Design and Fabrication methods of FW/blanket, divertor and vacuum vessel for ITER-FEAT [J]. Journal of Nuclear Material, 2001, 58-59: 573-578.
- [12] 吴宜灿,等. 聚变驱动次临界堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1):72-80.

- [2] 吴宜灿,汪卫华,刘松林,等. 聚变发电反应堆概念设计研究. 核科学与工程, 2005, 25 (1):76-85.
- [3] Wu Y, Wang W, Zheng S, et al. Conceptual Design of the Fusion-Driven Subcritical System FDS-I, presented in the ISFNT-7 conference, Tokyo, May 2005.
- [4] 黄群英,郁金南,万发荣,等. 聚变堆低活化马氏体钢发展综述. 核科学与工程, 2004, 24(1):56-64.
- [5] Tavassoli A A F, Rensman J W, Schirra M, et al. Materials design data for reduced activation martensitic steel type F82H. Fusion Engin. and Design 61-62 (2002) 617-622.
- [6] Wu Y, Wang W, Liu S, et al. Design Description Document for the Chinese Dual-Functional Lithium Lead-Test Blanket Module for ITER (2005).
- [7] ITER structural design criteria for in-vessel components (SDC-IC); Appendix B; Guidelines for analysis, in-vessel components. G 74 MA 8 01-05-28 W0, 2
- [8] Majumdar S. Structural design criteria for high heat flux components. Fusion Engin. and Design 49-50 (2000) 119-126.