

## ITER 中国液态锂铅实验包层 模块设计研究与实验策略

吴宜灿,汪卫华,刘松林,黄群英,郑善良,王红艳,陈红丽,陈明亮,  
柏云清,宋 勇,章毛连,柯 严,李春京,李艳芬,胡丽琴,刘 萍,  
李静惊,李 莹,许德政,曾 勤,陈义学

(中国科学院等离子体物理研究所,安徽 合肥 230031)

**摘要:**在广泛调研和深入分析国际聚变堆包层发展状况的基础上,根据液态锂铅包层一般特点和中国发展的系列液态锂铅包层概念设计,提出了一个具有演示氦气单冷却剂和氦气/锂铅双冷却剂包层技术的多功能包层模块实验系统方案,对其性能进行了分析研究,作为中国向 ITER 实验包层工作组(TBWG)提交的液态包层实验模块最终设计描述文件的内容框架。总结了该工作主要内容,包括基本设计思想和方案描述、性能分析概况、对辅助系统的要求和实验策略与关键技术等。

**关键词:**ITER;实验包层模块;液态锂铅;实验策略

**中图分类号:**TL642 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2005)04-0347-14

### The dual functional lithium lead test blanket module and the testing strategy for ITER

WU Yi-can, WANG Wei-hua, LIU Song-lin, HUANG Qun-ying, ZHENG Shan-liang,  
WANG Hong-yan, CHEN Hong-li, CHEN Ming-liang, BAI Yun-qing, Song Yong,  
ZHANG Mao-lian, KE Yan, LI Chun-jing, LI Yan-fen, HU Li-qin, LIU Ping,  
LI Jing-jing, LI Ying, XU De-zheng, ZENG Qin, CHEN Yi-xue

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

**Abstract:**Based on wide survey and analysis of development of the international fusion reactor blankets and the general characteristics of the liquid lithium-lead blankets, the Dual-Functional Lithium Lead-Test Blanket Module (DFLL-TBM) system, which is designed to demonstrate and validate the technologies of both the helium-cooled blanket

收稿日期:2005-07-11;修回日期:2005-08-25

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

作者简介:吴宜灿(1964—),男,安徽人,研究员,博士生导师,现从事先进核能系统相关研究与设计工作

and the helium/lithium-lead dual-cooled blanket, is proposed for testing in ITER referring to the relevant several conceptual designs in China. The paper summarizes the contents of the DFLL-TBM design for the Chinese Design Description Document submitted to ITER Test Blanket Working Group, including design philosophy, system description, performance analyses, requirements for ancillary systems, and testing strategy and key R&D issues etc.

**Key words:** ITER; test blanket module; lithium lead; testing strategy

1985 年在美、苏首脑的倡议和国际原子能机构 (IAEA) 的支持下, 一项重大国际科技合作计划——“国际热核实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, 简称 ITER)”得以确立并于 2005 年 6 月在莫斯科由欧共体、日、俄、中、美、韩六方签署协议, 计划在法国的迦达哈希建设, 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<sup>[1]</sup>。ITER 的建造将是人类推动聚变能利用的一个里程碑, 为聚变能的商业应用奠定基础。

在产生聚变能的聚变堆中, 包层是实现高环境适应性和低发电成本的聚变能源应用的关键能量转换部件, 其主要功能包括氚增殖、能量转换和辐射屏蔽等。

ITER 国际合作组织各成员国 (欧、日、俄、美) 1994 年成立了实验包层工作组 (TBWG-Test Blanket Working Group), 计划在 ITER 运行期间安装实验包层模块 (TBM: Test Blanket Module), 置于中子流强最高、热流密度最大的 ITER 装置赤道面位置的窗口, 来模拟和测试与未来聚变发电堆相关的材料和技术。根据 ITER 参加方情况变化, 自 2003 年开始, 重新成立了新的 TBWG 工作组来协调 TBM 及其实验计划的合作与发展, 中国和韩国也加入该工作组, 并首次参加了该工作组重新组建后的第 1 次会议 (即第 11 次 TBWG 会议)<sup>[2]</sup>。ITER 的实验包层基本目标如下:

1) 演示包层氚增殖性能和氚在线提取与控制技术;

2) 演示高温排热以及可用于发电热的获得能力;

3) 验证设计工具和数据, 包括中子学、电磁、热工水力、冷却系统设计、结构等软件代码

的有效性;

4) 证实包层在热、结构和电磁载荷作用下综合性能及事故态时的安全性;

5) 观察包层模块在可能辐照条件下的性能;

6) 证实维修途径和工具;

7) 获取包层及其实验模块相关的可行性信息。

第 11 次 TBWG 会议确立了 5 类包层概念作为重点研究对象, 液态锂铅增殖剂包层是其中最具发展潜力的概念之一, 并要求各方所设计的 TBM 应与未来聚变堆示范包层具有较好的相关性。中科院等离子体物理研究所 FDS (Fusion Design Study) 课题组目前负责中国液态锂铅包层实验模块的设计研究和技术发展工作。在广泛调研和深入分析国际聚变堆包层设计及技术发展情况和结合 FDS 课题组长在锂铅包层概念研究方面的经验, 提出了一个兼顾技术发展可行性和先进性、具有中国自己特色的锂铅实验包层方案, 称为双功能锂铅实验包层模块 (DFLL: Dual-Functional Lithium Lead) 实验系统, 它可以演示正在研究的聚变堆 (FDS-II) 双冷却剂高功率密度液态金属 (DLL: Dual-coolant Lithium Lead) 包层和单冷却剂液态金属 (SLL: Single-coolant Lithium-lead) 包层的相关技术<sup>[3]</sup>, 同时可以部分演示聚变驱动次临界堆 (FDS-I) 双冷嬗变 (DWT: Dual-cooled Waste Transmutation) 包层<sup>[4]</sup>和用于制氢目的的聚变堆 (FDS-III) 高温液态 (HTL: High Temperature Liquid) 包层的相关技术<sup>[5]</sup>。经过共五次 TBWG 会议的报告和讨论, 按 ITER 和 TBWG 的要求, 完成了该实验包层模块的设计描述文件 (DDD: Design Description Document)<sup>[6-10]</sup>。

## 1 液态锂铅包层特点

液态锂铅包层使用液态金属共晶体锂铅(LiPb)作为增殖材料,其中 Pb 用于增殖中子, Li 用于增殖氦,同其他液态增殖材料如 Li 及熔盐 Flibe 相比, LiPb 与水、空气等化学活泼性不高,安全性较好;与 Li 相比电导性不高, MHD 效应相对较弱;它与熔盐 Flibe 相比,与结构材料 RAFM 钢、绝热材料(例如碳化硅复合材料)有很好的相容性,对材料的腐蚀性低。

液态锂铅包层作为一种液态增殖剂包层同固态包层相比,其优点体现在:对 Tokamak 复杂几何具有很好的适应性,具有形成硬中子谱能力而具有很好中子经济性,因而具有高的氦增殖能力,无需在包层内专门安排高成本的中子增殖剂(如 Be);液态金属增殖剂本身也是氦循环载体,加之氦在其中的溶解度很低,可以设计实时在线的氦提取系统,因而也减少了包层更换频率,提高了堆的可用性;液态金属循环系统的存在可以实时在线补充消耗掉的<sup>6</sup>Li 同位素,因此液态金属增殖剂是一种无寿命限制的增殖材料;液态增殖剂由于具有很好的导热和载热能力,允许设计高功率密度、高热效率包层系统。目前参加 ITER 各方都非常重视液态包层的发展,其中欧共体、美国和中国均将液态锂铅包层作为主要研究对象之一而重点发展。

## 2 液态锂铅包层设计简介

### 2.1 氦气单冷包层与氦气-锂铅双冷包层

作为 FDS 课题组正在设计研究的系列聚变堆概念之一 FDS-II(聚变发电反应堆)选择一个具有 ITER 参数适量外推的等离子体物理与技术水平的聚变堆芯(其中大半径为 6 m,小半径取为 2 m,聚变功率 2 500 MW,聚变功率增益 30,规一化  $\beta_N$  值取为 5,第一壁平均中子壁负荷为  $2.72 \text{ MW/m}^2$ ,第一壁最大表面热流  $0.7 \text{ MW/m}^2$ )作为研究的出发点。

包层主体结构材料选取目前技术发展成熟程度相对最好的低活化铁素体/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>[11]</sup>,氦增殖剂则选用化学特性相对不活泼的锂铅共晶体。对这类液态包

层概念,有两种具体冷却方案可以考虑,即高压氦气冷却、准静态锂铅(SLL)包层概念和高压氦气冷却结构而液态金属自冷锂铅(DLL)包层概念,其中因 DLL 包层考虑使用热与电绝缘流道插件(如碳化硅复合材料)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 包层因液态锂铅流动速度缓慢,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。

为方便安装、维修与更换,同时减少等离子体破裂时的电磁力, FDS-II 包层设计采用模块化结构布置。图 1 为 DLL 外包层典型模块,其中环极向隔板、径极向隔板构成三排极向 LiPb 流道(LL<sub>1</sub>区、LL<sub>2</sub>区、LL<sub>3</sub>区),靠近第一壁(FW)LL<sub>1</sub>区的 LiPb 自上而下流动,在底部转向流入 LL<sub>2</sub>区、LL<sub>3</sub>区,再从下向上流动,最终汇总流入 LiPb 供/收箱。氦气主要用来冷却 FW 和隔板结构,氦气从联箱两侧交替进入 FW,呈 U 形流动,流入第二层联箱区,再进一步分别以 U、W、W 形流动方式流经环极向隔板、径极向隔板和盖板。为了减少氦的渗透,同时满足液态金属流道电绝缘和防腐蚀的要求而应考虑选用合适的结构涂层材料(如氧化铝)。冷却剂氦气工作压力为 8 MPa,氦气入口温度为 300 °C,出口温度为 450 °C。在 DLL 方案中由于考虑了流道插件以增加出口温度而获取高效率热能,因而液态金属 LiPb 出口温度可以设计为 700 °C, LiPb 进口温度取为 480 °C。由于第一壁是包层中面向高温等离子体和包层高

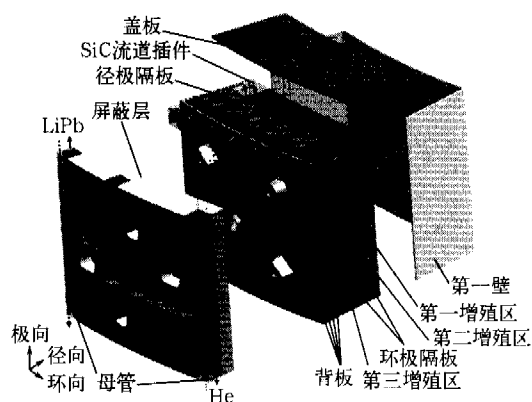


图 1 DLL 包层典型模块

Fig. 1 The exploded view of DLL blanket module

功率密度增殖区的重要部件,承受高能粒子流和高热流密度等高负载,因此适量厚度的耐高温材料(如 ODS-RAFM 钢)应考虑挂在 FW 面向等离子体的表面上。关于 FDS-II 及其 SLL 和 DLL 包层详细设计研究见文献[3]。

## 2.2 氦气-锂铅双冷嬗变包层和高温液态制氢包层

聚变次临界堆(如 FDS-I),利用聚变反应产生的中子作为外源,驱动次临界包层中的裂变反应,实现生产核燃料、嬗变核废料及增殖能量以满足聚变能获得商业应用之前大规模发展裂变核能的需要,同时也作为推动永久清洁能源—纯聚变能商用化技术发展的重要台阶。作为聚变次临界堆的关键部件参考设计之一氦气/LiPb 双冷嬗变包层(DWT: Dual-cooled Waste Transmutation)模块如图 2 所示,高压氦气用于冷却结构壁以及裂变产物嬗变区,液态 LiPb 既作为氦增殖剂又可实现自冷功能。外包层分为钢系同位素(AC)区(包括长寿命钢系元素 LLMA 嬗变区和 U 燃料增殖区)和长寿命裂变产物(LLFP)嬗变区,其功能包括增殖氦和核裂变燃料、嬗变长寿命核废料和产能。内包层包括 LiPb 氦增殖区和中子反射层等,主要用于产氦。FDS-I 及双冷嬗变包层详细设计研究见文献[4]。

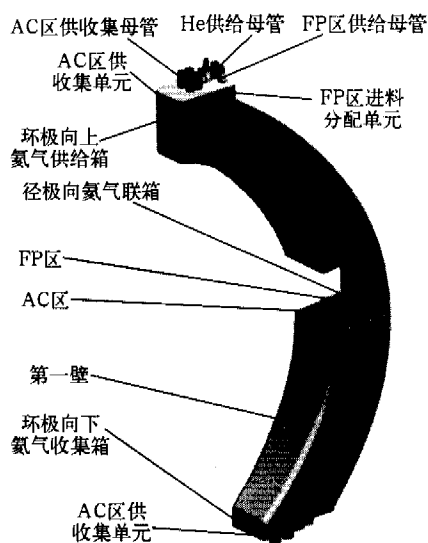


图 2 DWT 包层典型模块  
Fig. 2 DWT blanket module

高温制氢包层设计目的是将聚变能产生的高温热能应用到制氢领域,制氢工艺可选择碘—硫法或溴—钙—铁循环热化学等方法,将水在高温下进行裂解。为实现有效制氢通常需要超过 900 °C 以上高温热能,双冷高温液态锂铅(HTL: High Temperature Liquid)包层是正在设计研究的聚变高温制氢堆 FDS-III 可选包层方案之一,它兼有排出聚变所产生的核热、屏蔽中子和增殖氦等多种功能。考虑冷却剂出口温度高的特点,材料的选择至关重要,如耐高温材料碳化硅、W 合金等能够满足高温性能,但这些材料作为反应堆结构材料时技术发展还很不成熟,因此 FDS-III 的设计采用目前较为成熟 RAFM 钢作为结构材料、采用“多层热电绝缘流道插件”创新设计提高冷却剂 LiPb 的出口温度(大于制氢所需 900 °C 的高温),降低 LiPb 与结构钢的接触温度(低于 LiPb/RAFM 钢的最大兼容温度 $\approx 480$  °C),关于 HTL 概念设计参见文献[5]。

## 3 双功能锂铅实验包层模块设计

### 3.1 设计原则与要求

DFLL-TBM 设计原则是根据 ITER 的运行条件和要求,设计相应的可在 ITER 上进行测试的双功能实验包层模块系统(通称为 DFLL-TBM)实现 ITER 实验包层模块基本目标,演示和验证对应的 DEMO 包层相关技术或可外推得到对应的技术。它包括两类子模块设计,即 DLL-TBM 和 SLL-TBM, SLL-TBM 除了不需要安装热与电绝缘流道插件和无需实现自冷目的 LiPb 快速流动外,与 DLL-TBM 具有相似包层结构和辅助系统,也就是说一个基本的包层结构方案和相应的辅助系统可以分别用于 SLL 和 DLL 两类子模块的测试,这样既降低了技术发展风险又考虑了技术发展的潜力和可持续性。

重点介绍 DLL-TBM 的综合性性能模块方案设计和支持设计的性能分析,同时也与 SLL-TBM 方案进行比较。根据 ITER 不同运行阶段的实验条件和 TBM 实验策略,在 ITER 不同等离子体运行阶段,实验具体目标不同,诊断仪器的布置有所差别,应设计一个 TBM 系列,

大体包括进行电磁与力学性能测试模块(EM-TBM)、中子学性能测试模块(NT-TBM)、热工水力学性能和氦增殖能力与控制技术测试模块(TT-TBM)、综合性能测试模块(IN-TBM),它们在结构上略有差异,但都可以在此基本方案的基础上演变而成。

### 3.2 基本方案与参数

#### 1) 结构方案

DFLL-TBM 将安装在 ITER 窗口支撑框内,周边与支撑框架内侧壁有 20 mm 的间隙,供工具操作使用,按 ITER 要求 LiPb 总量小于 280L 的边界条件确定外形尺寸,其整体结构如图 3 所示。它由第一壁(FW)、焊接到 FW 内壁上的“ $\Gamma$ ”型环极隔板(tpSP: toroidal-poloidal Stiffening Plates)、径极隔板(rpSP: radial-poloidal Stiffening Plates)及背板构成坚固的矩形盒状结构,从等离子体向外径向上划分成第一壁、增殖区(LL<sub>1</sub>, LL<sub>2</sub>, LL<sub>3</sub>)、氦气联箱等区,隔板将增殖区分割成三排三列极向 LiPb 流道。选用 RAFM 钢作为结构材料,并考虑在设计中选择可起电绝缘作用同时减低 LiPb 对壁的腐蚀性和防氦渗透表面涂层的可能性。

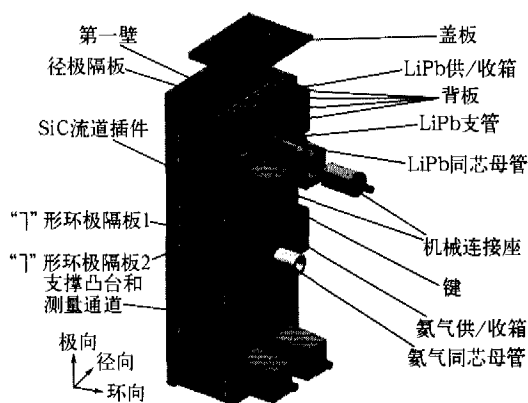


图 3 DFLL-TBM 总体结构

Fig. 3 3D Structure View of DFLL-TBM

在 TBM 径向安装有加强支撑凸台,保证联箱在氦气压力下有足够的强度,该凸台设计中空结构,中空部分可作诊断探头进入增殖区的通道。由于“ $\Gamma$ ”型隔板的 U 形供气方式,使 tpSP 和 rpSP 氦气流道各自独立,互不影响,隔板之间的流道无需对接,增强了结构及氦

气供给系统的可靠性,避免如美国 DCLL-TBM<sup>[12]</sup>存在的 tpSP 与 rpSP 供气流道之间交叉供气,造成隔板之间流道需要对接,制造工艺复杂、可靠性低的缺陷。背板 BP4 后部设有 4 个矩形键,键中间位置装配有螺栓,通过螺栓与支撑框连接,抵抗等离子体破裂时电磁力对模块的扭力作用。

两类子模块 SLL-TBM 和 DLL-TBM 具有类似基本结构,为实现 DLL 功能,在增殖区流道内安装流道插件(FCI),起到隔热和降低 MHD 效应作用,因而可设计较高的 LiPb 流速和出口温度,为平衡 FCI 内外压力,FCI 上应留有间隙或孔隙保证内外充满 LiPb。对 SLL-TBM, LiPb 在流道内缓慢流动仅用于载氦而不排热。DFLL-TBM 主要结构与热工水力学参考参数见表 1。

#### 2) 热工水力学方案

热工水力学方案包括氦气流动方案和液态金属锂铅流动方案。依据设计约束和功率平衡条件,在结构设计和中子学计算的基础上给出 DLL-TBM 氦气流动分配方案如图 4 所示。氦气自 TBM 后部同心母管外层流入供/收箱,由供气区通过 3 个支管进入第一层联箱,全部流入 FW。FW 内氦气在流道内流动带走结构沉积的核热和高负荷表面热流,氦气从联箱两侧交替进入 FW,每组流道在 FW 上绕 4 次,呈“U”形流入第二层氦气联箱。相邻两流道氦气流动方向相反,以便均匀 FW 上的温度分布,减小热应力。氦气由第二层联箱流入 rpSP、tpSP 和盖板,根据入口截面与流动阻力相关来分配氦气流入隔板和盖板的流量。

依据结构 RAFM 钢与 LiPb 相容性温度限制与获取高温核热要求,设计中考虑 LiPb 从双层同心母管的外层管流入,进入供/收箱,通过 3 个支管从 TBM 上部流入 LL<sub>1</sub> 区三个 LiPb 流道,从上向下沿极向流动,至 TBM 底部转向进入 LL<sub>2</sub> 区和 LL<sub>3</sub> 区,再从下向上流动,其中 LL<sub>3</sub> 区液态 LiPb 通过“ $\Gamma$ ”型隔板上部矩形孔流入 LL<sub>2</sub> 区,汇合后通过另 3 个支管流入供/收箱,高温氦气再由同心母管的内层流至辅助系统。

表 1 DFLL-TBM 主要结构与热工水力学参考参数  
Table 1 Main structural and thermal hydraulic parameters of DFLL-TBM

实验模块类型	DLL-TBM	SLL-TBM
外形尺寸	1 832 mm×626 mm×476 mm	
FW 热流密度	平均热流 0.3 MW/m <sup>2</sup> ,最大热流 0.5 MW/m <sup>2</sup> ,中子壁负荷 0.78 MW/m <sup>2</sup>	
总热源	0.92 MW	0.89 MW
冷却剂	氦气:压力=8 MPa 总质量流率=1.69 kg/s;TBM 内总体积=124 L 锂铅:压力=1 MPa 总质量流率=5.2 kg/s;TBM 内总体积=244 L	氦气:压力=8 MPa 总质量流率=2.15 kg/s TBM 内总体积=124 L
LiPb 同芯母管	同芯母管 $\phi$ (内/外)90/120 mm 进出口温度:480/700 °C; 进出口速度:162/153 mm/s, 质量流率:5.2 kg/s	流道尺寸: $\phi$ (内/外)90/120 mm 进出口速度:3~30 mm/s
增殖区 LiPb 流道	增殖区尺寸:LL <sub>1-3</sub> 区,80 mm×182 mm,90 mm×182 mm,136 mm×182 mm 插件与壁间隙尺寸:5 mm 流道尺寸:LL <sub>1-3</sub> 区,60 mm×162 mm,70 mm×162 mm,116 mm×162 mm 进出口温度:480/700 °C 平均速度:LL <sub>1-3</sub> 区,20/11/5 mm/s,质量流率:5.2 kg/s	流道尺寸:LL <sub>1-3</sub> 区,80 mm×182 mm,90 mm×182 mm,136 mm×182 mm 进出口温度:约 450 °C 平均速度:LL <sub>1-3</sub> 区,3/2/1 mm/s 质量流率:0.1~1 kg/s
He 气同芯母管	同芯母管尺寸: $\phi$ (内/外)90/120 mm 进出口温度:340/420 °C 进出口速度:78/58 mm/s, 质量流率:1.69 kg/s	流道尺寸: $\phi$ (内/外)90/120 mm 进出口温度:340/420 °C 进出口速度:98/74 mm/s, 质量流率:2.15 kg/s
第一壁 He 流道	第一壁尺寸:30(5/15/10) mm, 流道间距 5,组数 18,每组 4 排冷却管道成 W 形 流道尺寸:15(径) mm×20(极) mm,进出口温度:340/404 °C 平均速度:53 m/s,质量流率:1.69 kg/s	结构与左栏相同,流道尺寸:15 mm×20 mm 进出口温度:340/396 °C 平均速度:67 m/s 质量流率:2.15 kg/s
隔板(径极+环极) He 流道	径极隔板尺寸:厚度 10(3/4/3) mm, 流道截面 4(环)×8(极),每组 4 排流道成 W 形 环极隔板尺寸:厚度 10(3/4/3) mm,流道间距 3 mm 8 排流道成 U 形 流道尺寸:4 mm×8 mm,进出口温度:404/417 °C 平均速度:49 m/s,质量流率:1.13 kg/s	结构与左栏相同 流道尺寸:径极,环极 4 mm×8 mm 进出口温度:396/419 °C 平均速度:62 m/s 质量流率:1.43 kg/s
盖板 He 流道	盖板尺寸:厚度 32(8/16/8) mm,流道间距 9.5 mm 管道截面 8(环)×16(极),8 排冷却管道成 W 形 流道尺寸:8 mm×16 mm,进出口温度:404/414 °C 进出口速度:49 m/s,质量流率:0.563 kg/s	结构与左栏相同 流道尺寸:8 mm×16 mm,进出口温度:396/416 °C 进出口速度:62 m/s,质量流率:0.715 kg/s

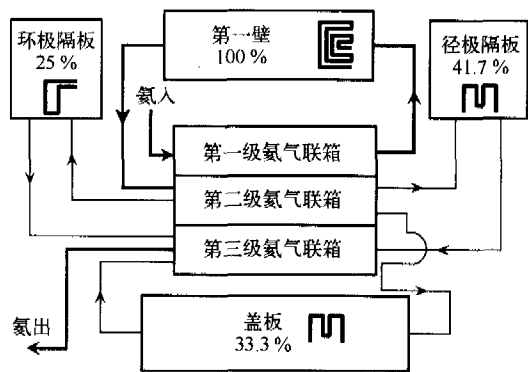


图4 DFLL-TBM 氦气流动流量分配

Fig. 4 He flowing scheme in DFLL-TBM

LiPb 流动速度可根据不同设计方案进行选择,当 TBM 演示的是 SLL 包层功能时, LiPb 缓慢流动仅用于载氦,不与二回路换热,其流动速度约为  $1\sim 3$  mm/s 量级;当 TBM 演示的是 DLL 包层功能时, LiPb 既用于载氦,又作为冷却剂载热, LL<sub>1</sub> 区 ~ LL<sub>3</sub> 区 LiPb 平均流速约为 10 mm/s 量级。

### 3) 材料设计

DFLL-TBM 设计中选用 RAFM 钢(例如 CLAM 钢<sup>[11]</sup>)作为结构材料,由于 RAFM 钢在辐照下出现低温脆化现象,其最低工作温度下限要求不低于  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而随着温度升高,材料屈服强度和蠕变强度下降,其最高工作温度不超过  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与 LiPb 相容温度限制为约  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。CLAM 钢是在综合和优化国际上多种 RAFM 钢成分和性能基础上设计出来的,同时具有自己的特色,相对于国际上正在研发的 RAFM 钢,CLAM 钢主要特点为:

① W 组分为 1.5 wt%,高于 EUROFER97 (1.0%),低于 F82H(2.0%),目的是减少焊接热影响区 Laves 相的析出,并保持所需的强度;

② Cr 含量为 9.0%,以期获得辐照前后最低的 DBTT 值。现阶段 CLAM 钢性能测试表明用标准夏氏冲击试样测试 DBTT 约在  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,其在室温和  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  下抗拉强度分别为 669 MPa 和 334 MPa,与 EUROFER97<sup>[13]</sup> 在同一水平,进一步的成分和热处理方案优化正在进行之中。

在包层设计中,为使 MHD 压降到一个可接受的水平,同时减少液态金属对结构壁的辐

射和氦向结构壁的渗透,以允许包层工作在较高的运行温度,一般要求涂层厚度与其电阻率的乘积大于  $100\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,为保证涂层的完全覆盖,理想情况下需要厚度  $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  的涂层,涂层的电阻率大于  $10^5\sim 10^6\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 。另外,要求涂层在运行温度( $450\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下与液态 LiPb 有较好的相容性和较高的渗透减小因子(如  $\text{TPRF}>5\sim 100$ )。在 DFLL-TBM 设计中考虑使用表面涂层以降低液态金属 LiPb 对结构材料的腐蚀,同时减小氦的渗透和 MHD 效应,就目前数据基础看  $\text{Al}_2\text{O}_3$  是一种可选方案,但目前辐照性能有待进一步研究。

在设计中 FCI 主要是作为热和电绝缘层来提高 LiPb 的出口温度同时可降低 MHD 效应,  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料是一种可能方案。对作为 FCI 的  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料强度的要求不是很高,但是对它的电和热物理性能有着特殊的要求,即它应有低电导率和低热导率,而且要与液态 LiPb 具有较好的相容性和加工性能,其允许工作温度范围要求不低于  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热导率小于  $2\sim 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,电导率小于  $20\sim 500(1/\Omega\cdot\text{m})$ 。

辅助系统中管道材料部分可以选用 316 L 奥氏体不锈钢或者 RAFM 钢,高温热交换器材料有待进一步设计和发展。

## 4 实验包层模块性能分析

本节给出包层基本性能和安全性能分析的主要模型和基本结论,详细的分析过程以及优化过程将在以后独立成篇发表。

### 4.1 中子学分析

在 ITER 高负荷 D-T 运行阶段, TBM 在中子辐照条件下氦增殖剂 LiPb 与中子发生核反应生产氦的能力和核热的产生与传输能力的测试是主要实验目标之一,中子学分析的主要内容是计算 TBM 模块的氦增殖能力和核热产生情况。

借助于 MCNP 自动建模与可视化程序 MCAM<sup>[14]</sup>,将 TBM 的 CAD 模型适当简化(如去掉圆角和小螺钉等)并转换成中子学模型后集成到经可视化反演的 ITER 基本中子学模型中(由于对称性,仅取  $20^{\circ}$  扇形范围,见图 5),使

用中子/光子耦合输运程序 MCNP/4C<sup>[15]</sup> 和 IAEA/FENDL-1 数据库<sup>[16]</sup> 计算了 DLL-TBM 和 SLL-TBM 的产氙能力和核热功率。

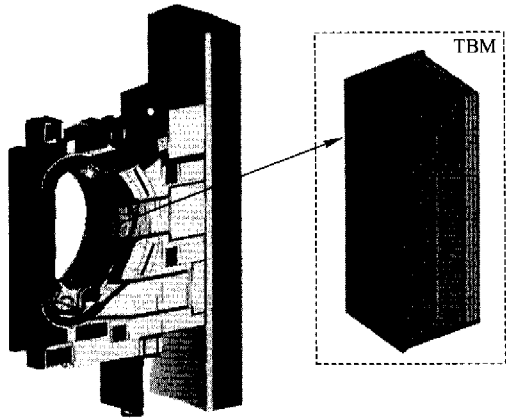


图 5 TBM 及在 ITER 基本中子学模型中的集成示意图  
Fig. 5 Neutronics model of TBM in ITER

结果表明 DLL-TBM 和 SLL-TBM 产氙量和核热相差很小 (<5%), 但氙增殖剂 LiPb 中的 <sup>6</sup>Li 浓度对氙的产生量影响很大, <sup>6</sup>Li 浓缩到 90% 时产氙量将比天然成分方案要提高约 2 倍。在典型负荷因子 (约 22%, 即每 1 800 s 放电一次, 典型放电脉冲长度 400 s) 情况下, DLL-TBM 日产氙量约 16.6 mg, SLL-TBM 的约 17.3 mg。DLL-TBM 和 SLL-TBM 的总核热功率分别为 0.57 MW 和 0.55 MW。

#### 4.2 热工水力学分析

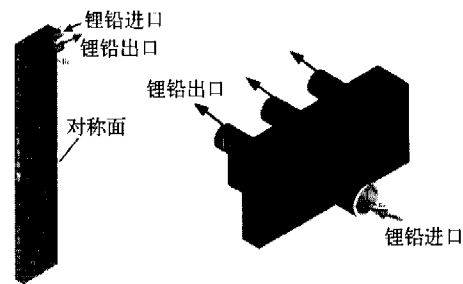
热工水力学分析的目的是考察冷却剂流动的温度变化、压力变化与驱动功率大小等情况, 以此来评估热工水力学方案设计的合理性, 对于液态包层来说, 液态金属流动的 MHD 效应是一个值得关注的重要问题。

##### 1) 锂铅流动 MHD 效应与驱动功率

导电的液态 LiPb 流体横穿磁场流动引起 MHD 效应带来的问题有: 造成 MHD 压降、影响分流以及改变流动特性影响传热等。利用基于商用计算流体动力学程序 FLUENT 开发的 MHD 模拟计算用户程序, 分别对 TBM 内部 LiPb 和供收箱内 LiPb 的流动进行建模和数值模拟。

如图 6(a), TBM 内部 LiPb 流动计算模型

在环向上取一组 LiPb 流体的一半, 极向和径向尺寸与实际模型一致, LiPb 的进口速度和温度分别为 0.062 m/s 和 480 °C, 假定管壁为电/热绝缘边界条件, 计算得到压力场分布见图 7(a)。从图中可以看出, DLL-TBM 内 LiPb 的 MHD 压降约 0.02 MPa, 压力梯度主要集中在进出口的突扩/缩部分, 且由于 LL<sub>1</sub> 流道内 LiPb 的流速最大造成 LL<sub>1</sub> 流道内压力梯度比 LL<sub>2</sub> 和 LL<sub>3</sub> 内压力梯度大。为了解进口供/收箱内 LiPb 的流动分流特征, 建立计算模型见图 6(b), LiPb 从环形管进入供/收箱后从三个圆形支管流出, LiPb 进口速度和温度分别为 0.16 m/s 和 480 °C, 管壁边界条件假定电/热绝缘, 计算得到速度场分布如图 7(b) 所示, 结果表明由于磁场作用改变了 LiPb 的流动速度剖面, 使三个支管内的流动呈不均匀分布, 中间支管的流动速度比两边支管内的速度稍低。



(a) TBM 内 LiPb 计算模型 (b) 供收箱内 LiPb 计算模型  
图 6 DLL-TBM 锂铅流动数值计算模型

Fig. 6 Models for Simulation of LiPb flow inside DLL-TBM

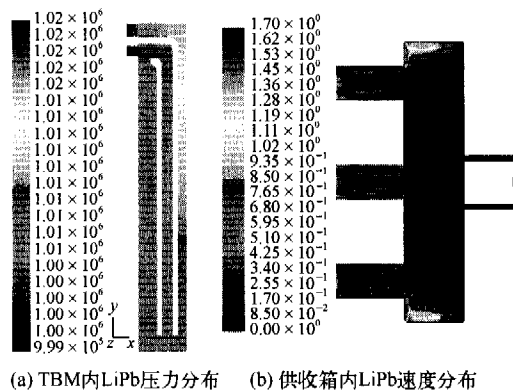


图 7 DLL-TBM 内锂铅流动计算结果

Fig. 7 Computational result of LiPb flow inside DLL-TBM



模拟计算得 LiPb 流动引起的总压降  $\Delta p$  约 0.12 MPa, 其中直管段和三维 MHD 压降分别约占总压降的 2% 和 98%。DLL-TBM 内 LiPb 的质量流率、平均密度和假设 80% 泵效率, 则 TBM 锂铅系统驱动功率可近似由式  $P = \eta \Delta p \frac{m}{\rho}$ , 计算得 87 W。

## 2) 氦气系统压降与驱动功率

氦气系统压力损失包括局部压力损失和沿程压力损失  $\Delta p = \frac{1}{2} \xi \rho v^2$ 。局部压力损失系数  $\xi$ , 与管道的特征和相关尺寸有着密切的关系, 对异型管, 如进出口, 弯管膨胀收缩管等, 可根据实验或经验公式进行估算, 沿程压力损失与流体的密度、速度、管道的粗糙度、流动性质、以及压力损失系数有关。对于外部氦气系统, 压力损失由冷氦气输入管、热氦气输出管、热交换器进出管、热交换器、各种阀门、进出母管及转弯处等引起, 估算的 DLL-TBM 和 SLL-TBM 氦气系统总压力损失分别为 0.88 MPa 和 1.07 MPa。根据氦气系统的总质量流率、氦气平均密度和假设的 80% 风机效率, 可以得到 DLL-TBM 和 SLL-TBM 的氦气系统所需的驱动功率分别约为 331 kW 和 508 kW。

## 4.3 结构力学分析

由于 DFLL-TBM 在 ITER 中直接面向等离子体, 承受高能粒子流和热流密度等高负载, 有必要对其结构温度场和应力场分布进行评估计算, 验证结构设计方案 (DLL/SLL-TBM) 的合理性和可行性, 并作为进一步优化分析的基础。

如图 8, 考虑对称性和周期性, DFLL-TBM 结构相应的三维计算模型 (其中 DLL-TBM 模型包含热、电绝缘流道插件) 在环向取结构模型的一半, 氦气联箱部分只考虑背板 1 结构, 极向高度选取 FW 的四个氦气流道。考虑 FW 最为严酷条件处, DLL-TBM 计算模型应取在模块下部第一增殖区 LiPb 温度较大处, 而 SLL-TBM 计算模型应取在模块上部隔板氦气温度最大位置, 此处携带 LiPb 核热能力最差。利用商用有限元程序 ANSYS 对模型进行模拟计算和分析。

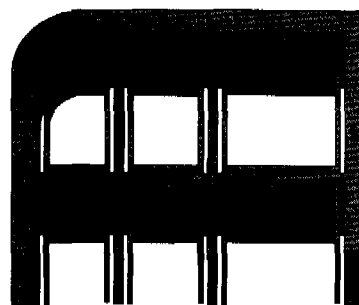


图 8 DLL-TBM 三维热-结构分析模型  
Fig. 8 3D model for thermo-mechanic analysis of DLL-TBM

对 DLL-TBM 而言, 根据中子学计算结果和热工计算假设 (LiPb 增殖区核热完全依靠自冷排热, 而结构、流道插件及插件与结构缝隙中 LiPb 核热完全依靠氦气排热), 结构最大温度 546 °C 和最大应力 340 MPa 均在材料极限范围之内。根据 ISDC (ITER Structural Design Criteria) 标准, 在 LOCA 事故下 (即整个 TBM 内部结构充满 8 MPa 氦气压力), 对 TBM 结构适当优化可以满足应力要求。

对 SLL-TBM 而言, 假设两种极限工况来评价 LiPb 增殖区核热对结构的最大影响, 即 LiPb 增殖区核热分别全部加载在 FW 结构和隔板上。结果显示, 两种工况下结构的最大温度 547 °C 以及结构和 LiPb 接触最大温度 478 °C 均没有超过材料的最大限制。但最大应力 410 MPa (对应温度约为 519 °C, 该温度下允许应力极限为 402 MPa) 超过材料限制, 主要是因为假设工况下热量的集中而造成极限的应力分布, 且在分析时忽略了 LiPb 流道的圆弧倒角。实际上最大应力和最高温度要小于上述数值, 即便过高也可以在设计中通过增加环极隔板和径极隔板, 相应提高隔板氦气携带 LiPb 核热的能力, 从而减少结构最大温度和应力。

上述结构分析没有考虑电磁载荷的影响, 实际上在 ITER 运行时, 特别是等离子体发生破裂时磁场的变化在 DFLL-TBM 结构上感应产生电流, 感应电流与磁场相互作用在结构上产生较大的电磁载荷, 具体结构设计中有必要对这些电磁载荷的大小和分布进行分析。

#### 4.4 材料活化分析

采用多功能中子学分析程序系统 Visual-BUS<sup>[17]</sup>及欧洲活化数据库 EAF-99<sup>[18]</sup>对 DLL-TBM 在包层综合实验阶段的活化特性(包括衰变余热、剂量率和活度)进行了计算和分析。活化计算中考虑了 TBM 受连续脉冲辐照 8 500 次,计算结果见图 9 和图 10 所示。在停堆零时刻, DLL-TBM 总余热功率和活度分别为 0.018 MW 和  $6.82 \times 10^{16}$  Bq,其中包层内滞留氚的活度为  $5.26 \times 10^{13}$  Bq(假设提氚效率 95%)。可以看出,主要由于 LiPb 中短寿命核素  $^{207m}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 800$  ms) 的贡献,停堆初期活度和余热主要受 LiPb 控制,但随着  $^{207m}\text{Pb}$  的迅速衰减,包层总活度和余热主要由结构材料贡献。

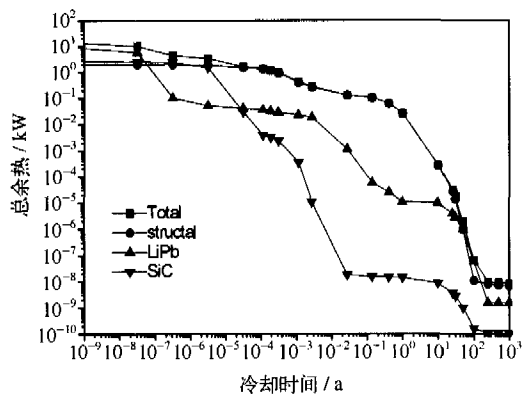


图 9 TBM 总余热和各个材料的贡献

Fig. 9 Total afterheat and its contribution from each material

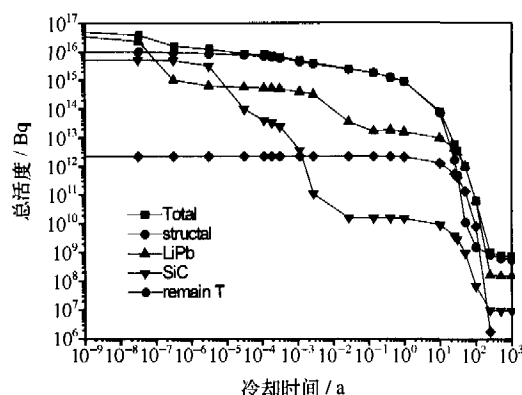


图 10 TBM 总活度和各个材料的贡献

Fig. 10 Total activity and its contributions from each material

参照欧洲聚变堆安全和环境评估 (SEAFP) 策略<sup>[19]</sup>中有关核废料的处理标准,根据上述计算,可以评估 TBM 各区材料在退役后的废料处理方式。结果表明,经过 50 a 的冷却后,所有废料都可以通过简单程序进行回收(包括远程操作方式和近程操作方式),而经过 100 a 的冷却后,所有的废料(不包括涂层材料)都可以经过近程操作进行简单回收。如果考虑  $\text{Al}_2\text{O}_3$  做包层涂层材料,由于其中 Al 受辐照会生成寿命核素  $^{26}\text{Al}$  ( $T_{1/2} = 7.4 \times 10^5$  a), 经过 100 a 后仍只可以采用简单程序远程操作进行回收。除了没有  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  插件复合材料, SLL-TBM 与 DLL-TBM 有类似活化特性。

#### 4.5 严重事故分析

安全分析是设计过程的一部分, TBM 允许放置在 ITER 中实验的前提是满足 ITER 对安全的要求,因而必须对与 TBM 相关的各种事故进行分析。下面分析几种典型事故情况下 TBM 的被动余热排出能力、系统增压以及产氢等方面对 ITER 的影响。

##### 1) 衰变余热排出能力验证

要求在堆芯正常停闭之后, TBM 所有冷却剂不能正常工作的情况下, TBM 能够依靠结构的热辐射将余热排出。由于 SLL 结构中无导热性能较差的流道插件, 其整体导热能力较 DLL 强, 且 SLL 衰变余热水平与 DLL 相当, 因此 SLL 的排热能力比 DLL 强, 在此不作进一步分析。通过对 DLL-TBM 径向一维 ANSYS 传热模型的分析得到 TBM 温度随时间的变化关系, 结果表明停堆后 FW 温度升高到 696 °C 后开始下降, 大约 10 d 后 TBM 温度降低到 307 °C, TBM 的衰变热排出能力能够满足 ITER 的安全要求。

##### 2) 产氢量

当发生真空室内部氦气泄漏事故时氦气进入等离子体区, 使得等离子体破裂, 破裂产生的力使得 TBM 和屏蔽包层破裂, LiPb 和水进入偏滤器区域, 水和 LiPb 发生化学反应产生氢气, 另外假设 FW 表面 2 mm 厚的镀层也会和水蒸气发生反应产生氢气。DLL-TBM 内部的 LiPb 体积为 0.244 m<sup>3</sup>, 小于 ITER 的限制 0.28 m<sup>3</sup>。SLL-TBM 内部的 LiPb 体积为

0.285 m<sup>3</sup>,略高于 ITER 的限制。但 DFLL 系统内的 LiPb 总体积为 0.5 m<sup>3</sup>,由文献[20]知即使完全进入真空室,实际的产氦量不超过2.5 kg,符合 ITER 的安全要求。DFLL 的 FW 上铍的质量为 4.6 kg,低于 ITER 的限制 10 kg。

### 3) 系统增压

当发生真空室内部氦气泄漏时,氦气的进入使得真空室压力升高,DFLL-TBM 系统的氦气总量约 16 kg,当发生第一壁冷却剂管道破裂事故时,假定氦气完全进入真空室内部,氦气的温度约 400 °C,真空室体积约 1 150 m<sup>3</sup>,真空室增压大约 19.5 kPa,氦气给真空室的增压相当有限,远低于 0.2 MPa 的限制。当发生真空室外部氦气泄漏时,氦气进入托卡马克冷却水系统拱顶,给拱顶造成的压力升高约为 320 Pa,对拱顶几乎不会造成影响。

## 5 包层实验对辅助系统的要求

### 5.1 锂铅辅助系统

LiPb 辅助系统为 TBM 的 LiPb 循环提供

运行回路,把 TBM 中产生的氦和核热带出来,以便在堆外提氦、排热,并进行 LiPb 杂质含量监测与净化,同时它能满足 SLL 功能和 DLL 功能的实验要求。设计具体要求包括:在装入 SLL-TBM 情况下,氦气能带走整个 TBM 中的核热,含有氦的 LiPb 缓慢地流出 TBM 后进入 LiPb 辅助系统,经过必要的氦提取和杂质清除后继续流回到 TBM 中;在装入 DLL-TBM 情况下,He 与 LiPb 都作为冷却剂,氦气主要冷却第一壁、TBM 结构,LiPb 主要携带自身核热(约占整个 TBM 功率 20%)。可选用内部有流道插件的同芯管为 LiPb 输送管道,以解决结构材料高温性能问题,且减少氦渗透。为了解决高温 LiPb/He 热交换器的结构材料问题,目前可考虑采用增加旁路的方法,使冷的 LiPb 通过旁路进入 LiPb 输送管道与高温 LiPb 相混合,LiPb 将以目前结构材料所允许的温度进入提取氦子系统和热交换器进行提氦、换热,而最终的办法是加紧研制先进耐高温的结构材料。参考的 LiPb 辅助系统方案见图 11。

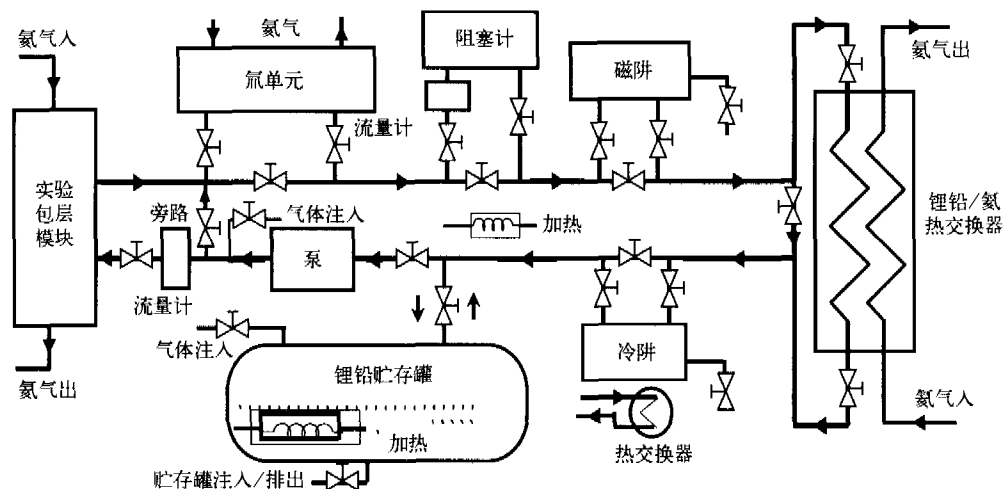


图 11 DFLL-TBM 锂铅辅助系统参考方案

Fig. 11 Flow diagram of the LiPb auxiliary system

### 5.2 氦气辅助系统

氦气辅助系统是为 TBM 提供可控氦冷却剂的实验支撑系统,需要满足 DLL 和 SLL 两种功能的实验需要。该系统由结构/氦和 LiPb/氦两条氦气回路组成。考虑到 ITER 的

热负荷条件,该系统主要设计要求为:当进行 DLL-TBM 实验时,结构/氦主回路携带 FW 和 TBM 结构上约 0.7 MW 核热,此时氦气质量流率约 1.69 kg/s;LiPb/氦回路作为 LiPb 回路的次级回路,通过 LiPb/He 热交换器与

LiPb 换热约 0.21 MW, 氦气质量流率约 0.37 kg/s。当进行 SLL-TBM 实验时, 仅使用结构/氦主回路排出 TBM 全部核热(约 0.89 MW), 氦气质量流率约 2.15 kg/s。两条冷却回路都

在距 TBM 约 100 m 远的 ITER-TCWS 拱顶内与冷却水系统换热, 水的入口温度 35 °C, 出口温度 75 °C。参考的氦气辅助系统方案见图 12。

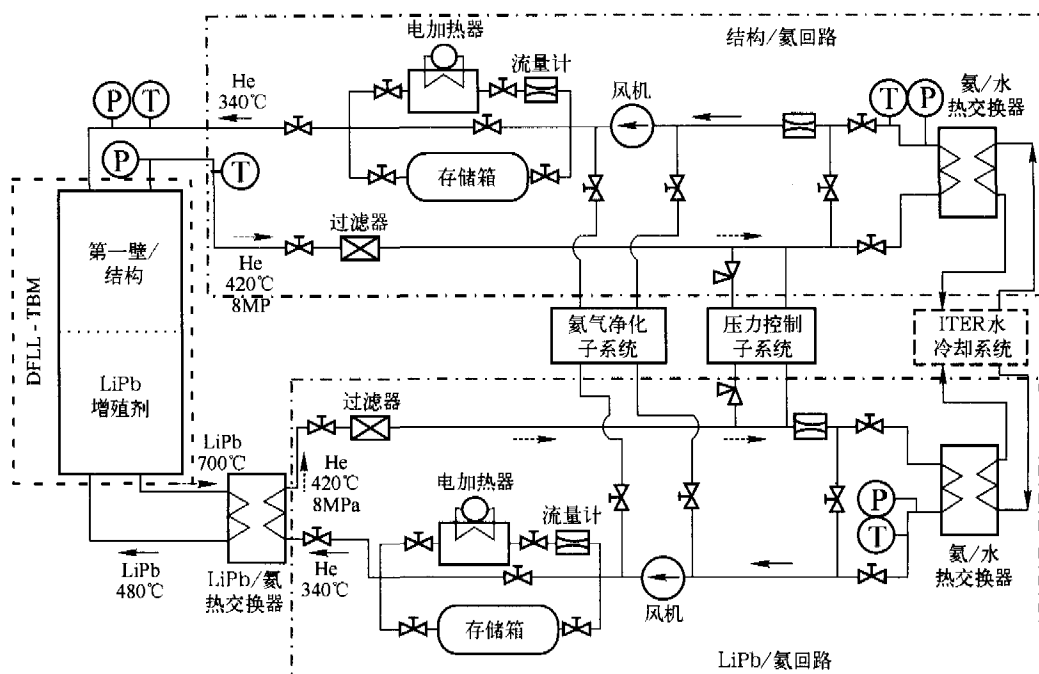


图 12 DFLL-TBM 氦气辅助系统参考方案

Fig. 12 Flow diagram of the helium auxiliary systems

## 6 实验包层模块实验策略与关键技术发展

### 6.1 实验策略

为降低潜在的风险, 追求技术发展潜在前景, DFLL-TBM 双功能实验策略分为两步, 即先期进行 SLL-TBM 实验, 之后进行 DLL-TBM 实验。缩小尺寸的 SLL-TBM 和 DLL-TBM 两种子模块可先于 ITER 进行测试, 即在中国超导托卡马克核聚变实验装置 EAST(计划于 2006 年初建成)上进行实验。因为 EAST 的电磁参数和 FW 平均热流密度与 ITER 接近(预期参数见表 2), 可为 TBM 实验提供有价值的前期实验平台, 也就是说在 ITER 的 H-H 和 D-D 运行阶段的大部分实验可早于 ITER 在 EAST 上进行, 获得的数据和经验可以用于优化和改进 ITER-TBM 系统设计, 修正 ITER-TBM 实验计划。

表 2 ITER 和 EAST 参数比较

Table 2 Comparison of the parameters of EAST and ITER

Device	EAST		ITER	
	DD	HH	DD	DT
Phase	DD	HH	DD	DT
R/m	1.95			6.2
A/m	0.46			2
Bt/T	3.5~4.0			5.3
Neutron rate/ $n \cdot s^{-1}$	10 <sup>15</sup> ~10 <sup>17</sup>			1.77×10 <sup>20</sup>
Avg. HF/ MW·m <sup>-2</sup>	0.1~0.2	0.11		0.27
Port Size	0.97 m×0.53 m		2.2 m×1.7 m*	
Pulse/s	~1 000	100~200		400

\* ITER 的半窗口宽度

具体来说, DFLL-TBM 实验计划分成 3 个阶段:

1) 在材料 R4D 基础上进行 Tokamak 装置外小模块(1:5)实验,主要验证 TBM 材料及加工技术和流体动力学特性;

2) 在 EAST 中进行中等尺寸(1:3)模块实验,以初步验证 TBM 的结构特性和在电磁、热力学、中子学等方面的设计工具和程序,检查实验仪器的可行性,评价 MHD 效应以及 TBM 对等离子体性能影响等;

3) 在 ITER 上进行全尺寸(1:1)大模块实验,在 ITER 运行的前 10 年间,对应 H-H、D-D、低负荷和高负荷 D-T 等 4 种不同的等离子体运行阶段,DFLL-TBM 依次被设计成 EM-TBM(测试结构与电磁效应,校核 EAST-TBM 的试验结果);NT-TBM(进一步测试中子学性能,验证程序与数据);TT-TBM(测试热力学和氦性能,验证氦控制技术);IN-TBM(进行综合测试,演示除材料高通量辐照性能外的各项主要 DLL 包层技术),为最终建造商用聚变堆提供依据。

由于 ITER 实验窗口和窗口外 Port Cell 区空间有限,不可能布置多套辅助子系统,参考目前各国 TBM 的设计,实行空间共享实验策略比较困难,时间共享模式则可能是现实的。尽管困难,但通过减小 TBM 大小和采取共同的设计界面共享辅助系统,空间共享方案也是有可能的。上述测试计划可根据实验目标和条件,在与对此类包层感兴趣的 ITER 各方协调下,进行设计优化和合作发展。

## 6.2 关键技术

为进行 DFLL-TBM 系统实验,特别需要发展的关键技术如下:

1) 流道插件:流道插件技术是 DLL 概念特需的技术,FCl 作为电与热绝缘部件,直接关系到 MHD 效应和传热行为,FCl 材料应有低电导率和低热导率,在高温下与液态 LiPb 有好的相容性,具有抗中子辐照能力及防氦渗透能力,大尺寸 FCl 材料及部件的加工技术也是开发的重点和难点;新概念 FCl 设计也值得认真探索。

2) 涂层技术:涂层技术是液态包层特需的技术,主要目的是防腐蚀、电绝缘,同时也减少氦渗透。涂层要求在高温、高辐照环境下与基

体结构材料有好的相容性,具有自修复能力的涂层显然是发展的重点。

3) 高压 He 回路 LiPb 回路及高温热交换器技术:这包括回路安全运行、氦渗透最小化、考虑与 LiPb 相容性的高温热交换器材料发展等。

4) 氦提取技术:从液态 LiPb 在线提氦和高温氦渗透阻止技术是液态包层特需的技术,而从氦气中提氦则是很多包层共有的技术。

5) 结构材料技术:低活化结构材料 RAFM 钢规模冶炼技术、热处理技术与加工技术是需要重点发展的包层材料技术。

## 7 总结

通过分析液态锂铅包层特点,结合 FDS 课题组完成的锂铅系列包层概念设计方案及相关技术要求,依据 ITER-TBM 实验目标和实验条件,给出了 ITER 中国液态锂铅实验包层模块及其辅助系统设计框架与要求,并对方案进行了初步的性能分析,包括中子学、热工水力学、结构力学、材料活化及严重事故态的安全分析等,初步验证了方案的可行性和合理性,在此基础上给出了建议的实验策略与待发展关键技术。进一步的工作应包括设计方案的优化、各阶段子模块的设计、辅助系统的详细设计、关键技术的发展和详细实验计划的制定等。

## 参考文献:

- [1] ITER-FEAT Outline Design Report, ITER Meeting, Tokyo, January 2000.
- [2] The minutes of the 11<sup>th</sup> TBWG-11 Meeting, ITER-Joint Working Site, Garching, Germany, Oct. 22-24, 2003.
- [3] 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.
- [4] 吴宜灿,柯严,郑善良,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.
- [5] 陈红丽,吴宜灿,柏云清. 聚变制氢堆高温液态包层热工水力学新概念研究[J]. 核科学与工程, 2005, 25(4).
- [6] Wu Y, et al. Design Activities of Fusion (hybrid) Reactors in China, presented at the ITER TBWG-11 Meeting, Garching, Germany, October 22-24, 2003.
- [7] Wu Y, et al. China LiPb Blanket (CLLB) Concept,

- presented at the ITER TBWG-12 Meeting, Naka, March 9-11, 2004.
- [8] Wu Y, et al. Preliminary Design of DFLL(Dual Functional Lithium-Lead) TBM for ITER, presented at the ITER TBWG-13 Meeting, Garching, July 7-9, 2004.
- [9] Wu Y, et al. Design Status of FDS DEMOs and DFLL-TBM, presented at the ITER TBWG-14 Meeting, Naka, December 15-17, 2004.
- [10] Wu Y, et al. Design Description Document for the Dual Functional Lithium Lead Test Blanket Module for ITER, presented at the ITER TBWG-15 Meeting, Garching, July 12-13, 2005.
- [11] 黄群英, 郁金南, 万发荣, 等. 聚变堆低活化马氏体钢发展综述[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 56-64.
- [12] Wong C, Abdou M, et al. Design Description Document for the U. S. Dual Coolant Pb-17Li(DCLL) Test Blanket Module, Report to the ITER Test Blanket Working Group(TBWG), 2005.
- [13] Rieth M, Schirra M, et al. Eurofer97-Tensile, Charpy, Creep and Structural Tests [R]. FZKA 6911(2003).
- [14] 吴宜灿, 李莹, 卢磊, 等. MCNP 粒子输运计算自动建模程序的研究与发展[J]. 核科学与工程, 2005, 25(4).
- [15] Briesmeister J F (Ed. ), MCNP4C General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000.
- [16] Pashshenko A B. Completion of FENDL-1 and Start of FENDL-2, IAEA Report INDC (NDS) - 352, 1996.
- [17] Gao Chun-jing, et al. Integral Data Test of HENDL 1.0/MG and VisualBUS with Neutronics Shielding Experiments (I) [J]. Plasma Physics and Technology, 2004, 6(5): 2507-2513.
- [18] Sublet J C, et al. The European Activation File; EAF-99 cross section library, UKAEA Fusion, Report UKAEA FUS 408, December 1998.
- [19] Rocco P, et al. Recycling and clearance possibilities-final report of task 4. 2, SEAFP2; 4. 2; JRC: 4 (Rev. 1), September 1998.
- [20] Vetter J E, et al. ITER-FEAT, Report from the TBWG for the Period of Extension of the EDA, May 2001.