

ITER 中国液态锂铅实验包层模块 氦气冷却系统初步设计研究

刘松林, 汪卫华, 龙鹏程, 吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:氦气冷却系统是 ITER 中国液态锂铅实验包层模块(DFLI-TBM)在 ITER 装置内进行实验的重要辅助系统。根据 ITER 运行时的热工条件、安全要求、空间要求,分析了 DFLI-TBM 氦气冷却系统的功能,确定氦气冷却系统的设计原则和要求,在此基础上给出氦气冷却系统的初步设计方案和设备布置。该氦气系统的特点体现在:双功能,即有宽的裕量满足 SLL-TBM 和 DLL-TBM 实验;两条氦气回路共享压力控制单元和氦气净化子系统;旁路设计调节 TBM 和热交换器氦气的出口温度。

关键词:ITER; 实验包层模块; 氦气冷却系统

中图分类号: TL64 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0918(2006)02-0183-05

The preliminary design of the helium cooling system for the dual-functional lithium lead test blanket module for ITER

LIU Song-lin, WANG Wei-hua, LONG Peng-cheng, WU Yi-can

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

Abstract: The helium cooling system is an important ancillary system of the dual-functional lithium lead test blanket module (DFLI-TBM) for ITER. Based on thermal hydraulic conditions, safety and space requirements for ITER, the function analysis and the design principles, the preliminary design and the components' arrangement of the helium cooling system are proposed for DFLI-TBM. The features of the system is that the equipment specification has wide margin for DLL-TBM and SLL-TBM test, i. e. dual function, and that both helium loops share pressure control unit and helium coolant purification sub-system, and that bypass design can adjust outlet temperature of helium for the DFLI-TBM and the thermal exchanger.

Key words: ITER; test blanket module; helium cooling system

收稿日期: 2006-01-17; 修回日期: 2006-02-17

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: 刘松林 (1967—), 男, 河北丰润人, 副研究员, 在读博士生, 从事反应堆结构设计、虚拟现实仿真研究

DFLL-TBM (Dual-Functional Lithium Lead Test Blanket Module)是为演示中国发电反应堆(FDS-II^[1])包层相关技术而设计的在国际热核实验堆(ITER)进行实验的包层模块^[2-3],它有两类子模块:SLL-TBM子模块(Single-coolant Lithium-lead Test Blanket Module)和DLL-TBM(Dual-coolant Lithium-lead Test Blanket Module)子模块。在DLL-TBM实验时,氦气和液态金属锂铅作冷却剂,氦气冷却第一壁(FW)和TBM结构墙板,锂铅自冷;在SLL-TBM实验时,锂铅仅用于提氦,氦气作冷却剂排出TBM全部热能。氦气冷却系统是完成DFLL-TBM实验任务的重要辅助系统。

根据ITER运行时的热工条件、安全要求、空间要求^[4]、DFLL-TBM功能要求,在充分调研^[5-9]的基础上,对DFLL-TBM氦气冷却系统进行初步的设计研究。

1 系统功能及设计原则

1.1 系统功能分析

TBM氦气冷却系统被要求布置在ITER水冷却系统(Tokamak Cooling Water System, TCWS)拱顶内,距TBM实验窗口约100 m。ITER对TBM内锂铅总量有安全限制要求,从安全和经济上考虑,锂铅不作长距离传送与TCWS换热,锂铅辅助系统设备仅位于ITER窗口单元内(Port Cell);另外锂铅遇水反应产生氢气,锂铅与水换热存在安全隐患,而氦气因化学上的惰性、良好的核性能、较好的传热和载热特性,具有方便操作、易于净化的特点,因此在DLL-TBM实验时,选用氦气作为传热和载热介质,在锂铅-氦气热交换上与锂铅换热,热的氦气再送到TCWS与水换热;从氦气流速匹配、换热、温度限制的角度分析,冷却了FW和结构的氦气不能直接串连到锂铅-氦气热交换器与锂铅进行换热。因此,要满足DFLL-TBM实验,DFLL-TBM氦气系统需有两套独立氦气冷却回路,一条称为主传热回路(结构/氦气回路),直接接入TBM,氦气排出TBM内的核热,再被送回ITER拱顶与TCWS换热,该回路在SLL-TBM和DLL-TBM实验

时都投入运行;另一条称为次传热氦气回路(锂铅/氦气回路),仅在DLL-TBM实验时投入运行,作为锂铅换热的次级回路。

ITER运行时的热载荷条件为平均表面热流密度 0.3 MW/m^2 ,平均中子壁载荷 0.78 MW/m^2 ,在DLL-TBM实验时,TBM产生的总核热功率为 0.91 MW ,其中在FW和结构墙板上 0.7 MW 的热能由主传热回路氦气排出,沉积在锂铅中 0.21 MW 的核热由锂铅自排,并在TBM外与次传热回路氦气换热。在SLL-TBM实验时,约有 0.89 MW 的核热全部需要主传热回路氦气载热排出。考虑到DFLL-TBM结构材料CLAM钢的使用限制,经通过热工水力学分析,确定氦气的平均出口热端温度约为 $420 \text{ }^\circ\text{C}$,入口温度为 $340 \text{ }^\circ\text{C}$,氦气工作压力为 8 MPa 。主要的设计参数总结在表1中。

表1 DFLL-TBM氦气冷却系统的主要设计参数
Table 1 Design parameters for helium cooling system of DFLL-TBM

	DLL		SLL
	He	LiPb	He
平均热流密度/ (MW/m^2)	0.3	0.3	0.3
平均中子壁载荷/ (MW/m^2)	0.78	0.78	0.78
核热/(MW)	0.70	0.21	0.89
氦气进出TBM 的温度(进/出)/ $^\circ\text{C}$	340/420	480/700	340/420
冷却剂压力/ MPa	8	1	8
冷却剂质量流率/ (kg/s)	1.69	5.20	2.15
二级冷却回路/ (ITER水冷回路)	水	氦气,水	水
氦/水热交换器 进出口温度(进/出)/ $^\circ\text{C}$	35/43	340/420,35/70	35/70

DFLL-TBM在ITER不同等离子体运行阶段(H-H、D-D、D-T等离子体)实验,在ITER正常功率运行、启动和停堆时,氦气回路系统需提供足够的流量,以带走TBM的核热,因此该氦气系统需根据TBM的实验要求和ITER的运行工况调节氦气流量。

氦气是易于泄漏的气体,DFLL-TBM氦气

系统须处于密闭回路系统中,能对氦气进行存储和回收,在回路运行发生瞬变时维持回路运行压力恒定。

DFLL-TBM 氦气系统的杂质主要来源:初装氦气时混入的其他气体;回路充氦前,容器和管道内壁附着的气体;最主要的来源是从 FW 和增殖区渗透到氦气回路的氙;为了保证 DFLL-TBM 实验时氦气纯度达到要求,降低氙向 ITER 水冷系统和环境渗透,氦气冷却系统需要接入氦气净化系统,根据杂质浓度,开启氦气净化系统去除杂质。

对于高温高压的 DFLL-TBM 氦气冷却系统,其安全问题无疑是非常重要的,发生设备事故后果是严重的,将危及 TBM 实验和 ITER 设施的安全。为此在设计中要充分考虑到安全因素。必须对系统运行状态进行测量、监视,控制系统的运行,在事故状态下对系统进行安全保护。

1.2 设计原则

通过对 DFLL-TBM 氦气辅助系统的功能分析,确定该系统的设计原则和要求:

1) 系统设计应有一定的冗余,对应 ITER 不同的运行阶段,既可用于 SLL-TBM 实验,又

可满足 DLL-TBM 实验需要,反映出其双功能的特点;

2) 氦气回路应可靠密封,回路压力发生瞬变时,能维持系统的压力恒定。

3) 根据回路内杂质浓度设定,自动进行杂质处理,确保氦气纯度,减少氙渗透到环境中;

4) 可远距离通过氦气传热,与 ITER 水冷系统换热;

5) 满足 ITER 的空间要求和安全要求,充分考虑系统的安全因素,兼顾考虑经济性。

2 系统设计

2.1 系统结构

氦冷却系统为实现其功能主要由独立的主传热氦气回路(结构/氦回路)和次传热氦气回路(锂铅/氦回路)组成,氦冷却系统运行流程见图 1。每个回路的主要部件构成基本相同,由氦气风机,氦气/水热交换器,储气箱,压力控制单元,氦气净化单元,电加热器,各种阀门(安全阀,控制阀等),过滤器和测量仪表(测量物理量有温度、压力、压差、流量等)等构成。从经济和空间节约的考虑,两个氦气回路共享压力控制和氦气净化单元。

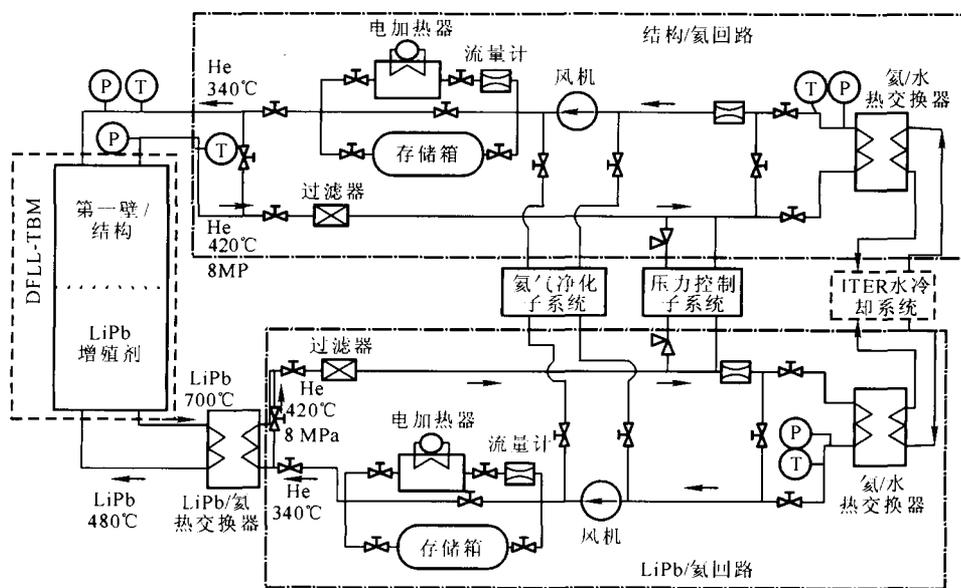


图 1 DFLL-TBM 氦气辅助系统运行流程图

Fig. 1 Flow diagram of the helium auxiliary systems

2.2 氦气运行流程

2.2.1 结构/氦气回路

低温氦气经风机送出后,根据 ITER 的运行工况(比如堆启动时)将氦气送入电加热器预热到 340 °C,再送入 TBM。氦气在 TBM 内冷却第一壁和结构后,以 420 °C 出口温度流经热管段上的过滤器过滤掉颗粒杂质后,送入 ITER 拱顶内的氦/水热交换器,与 TCWS 水冷系统换热,再流回循环风机入口。TBM 进、出口之间和氦/水热交换器进、出口之间的旁路主要是根据 TBM 不同的实验条件调节氦气温度。通过电源调频控制调节氦气风机电机转速来调节回路的氦气流量。压力控制和氦气净化单元直接经支管连接到主干回路。

为保证氦气系统高温安全运行,需在重要设备之间建立安全连锁保护措施,比如当管路出现故障使氦气不能正常循环,加热器不能工作^[10]。阀门被用来隔离冷却回路,控制系统的启动和停止,调节氦气流量。这些操作都在计算机系统的监视、测量、控制下。

2.2.2 锂铅/氦气回路

氦气运行流程与结构/氦气回路基本相似。

2.3 压力恒定控制

压力控制单元的功能是氦气储藏和供应,回路压力控制和过压保护。

氦气的供应和储存环节由储藏罐,缓冲罐,压缩机,压力调节器和一些必要的阀门组成。储藏罐在回路开始运行时向回路加压供应氦气,在回路停止运行、维修期间和事故时,排空回路氦气并送入储藏罐进行储存;在回路运行中发生瞬变时,维持回路运行压力恒定,即储藏罐正常运行时保持低压,当回路内氦气压力瞬间较高时,氦回路内氦气经压力调节器和阀门流回储藏罐。当氦回路的氦气少量泄漏损失时,由保持高压的缓冲罐向氦回路补充氦气。

安全阀用于过压保护,当回路压力过压时,安全阀打开,将回路氦气排入保持低压的储藏罐中。另外,当压力调节器出现故障,安全阀对平衡回路压力也有一定作用。

2.4 氦气净化系统

一定比例的氦气从风机两端分流引入位于 ITER 氦处理厂的氦气净化系统中,氦气中的氡通过催化氧化和分子筛床吸收法被移除^[3]。

2.5 系统密封与保温

氦气系统设备之间、设备与管道、管道与管道之间的连接须选择可靠的密封设计,比如根据设备对象不同选用耐高温的密封垫,采取唇封密封、迷宫密封等设计,防止氦气泄漏。

氦气系统输气管路单根长近 100 m,载气管道外须安装绝热层,防止氦气携带的热能中途耗散掉。为减少氦渗,载气管道内壁有致密防氦涂层。

3 主要设备

3.1 氦气风机

氦气风机是 DFLL-TBM 氦气回路的心脏,驱动氦气在回路中循环流动。该风机是离心式压缩机,为全覆盖式结构,电机密封于风机的压力壳中,避免造成氦气泄漏^[11]。风机工作压力为 8 MPa,为防止过压,留有 10% 的裕量。风机本身需有水冷却系统冷却,确保其工作温度在允许的范围內。

3.2 电加热器

氦气电加热器是 DFLL-TBM 氦气回路中的关键设备之一。此设备要承压耐高温,要能提供足够的功率并有良好的传热性能,此设备还要有可靠的电密封和绝缘性能。

3.3 热交换器

氦气冷却系统的氦/水热交换器考虑是壳-管型热交换器,水在有鳍的管之间流动,氦气在有鳍的管内流动而被冷却。要求热交换器换热面大,流体阻力小。

4 设备布置

DFLL-TBM 氦气冷却系统的主要部件布置在 ITER TCWS 拱顶内,表 2 列出了主要部件的参考尺寸,图 2 显示氦气冷却系统主要设备的初步布置。

表 2 主要部件的参考尺寸

Table 2 Reference dimension of the He loop main components (Dimension not including thermal insulator)

部件	数量	直径/m	长度/m
热交换器	2	0.15	1.6
风机	2	1	1.4
电加热器	2	0.3	1.5
输气管道	4	0.1	200
阀门	26	0.2	0.2
过滤器	2	0.3	0.4

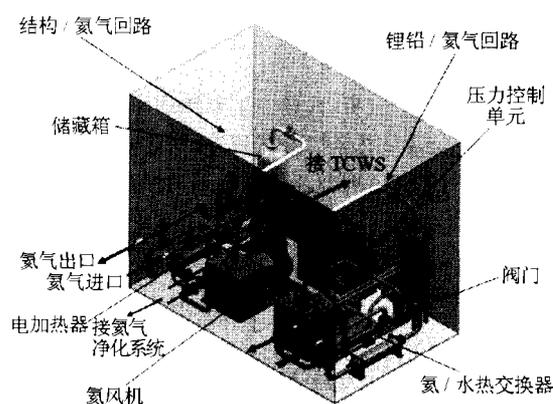


图 2 氦气冷却系统设备在 TCWS 拱顶内的布置

Fig. 2 Arrangement of the helium coolant loops in TCWS vault

5 总结

根据 ITER 运行时的热工条件、安全要求、空间要求,分析 DFLL-TBM 氦气冷却系统的功能,确定氦气冷却系统的设计原则和要求,在此基础上给出氦气冷却系统的初步设计方案和设备布置规划,并对系统结构、氦气流程、系统安全运行、主要子单元及主要部件进行了描述。该氦气系统的特点体现在:①双功能,有宽的

裕量满足 SLL-TBM 和 DLL-TBM 实验;②两条氦气回路共享压力控制单元和氦气净化子系统;③旁路设计调节 TBM 和热交换器氦气的出口温度。本工作作为后续研发积累了经验。

后续工作应包括设计方案优化和细化,关键技术的研究和发展(比如氦风机、换热器等主要部件、回路密封技术、控制技术),详细安全措施制定,开展实验验证工作。

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] 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.
- [3] Wu Y, Wang W, Liu S, et al. Design Description Document for the Chinese Dual-Functional Lithium Lead-Test Blanket Module for ITER (2005).
- [4] The 2005 TBWG Final report. EU report to the ITER Test Blanket Working Group [R]. ftp. itereu. de, 2005, 9.
- [5] 博金海,等. 氦气实验回路的建造和初步运行 [J]. 高技术通讯, 1993(8):37-39.
- [6] Wang Jie, et al. The experimental study on the helium circulator of HTR-10 [J]. Nuclear engineering and design. 2001(210):259-264.
- [7] Design Description Document for the European Water-Cooled Lithium-Lead Test Blanket Module, 2001, 6.
- [8] Wong C P C, et al., Ancillary systems for dual coolant liquid breeder test blanket modules, interim report to the ITER test blanket working group (TBWG). GA-24754, 2004.
- [9] Boccaccini L V, et al. Design Description Document for the European Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) Test Blanket Modules.
- [10] 博金海,等. 氦气试验回路的高温安全运行 [J]. 高技术通讯, 1997(11):46-49.
- [11] 周惠忠,等. HTR-10 主氦循环风机的设计、试验和运行 [J]. 核动力工程, 2004, 25(1): 54-58.