

聚变发电反应堆双冷液态 锂铅包层模块结构设计与分析

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: 给出聚变发电反应堆 FDS-II 模块式液态锂铅包层(DLL)结构方案, 以低活化马氏体(RAFM)钢为结构材料, 采用液态金属 LiPb 作为增殖材料和冷却剂, 使用碳化硅流道插件作为电绝缘和热绝缘。包层的设计特点体现在: 从增殖区、冷却剂流道、屏蔽包层、母管、机械连接、维修装配等几个方面全局考虑包层设计, 结构布置完整; 独有的“}]”形隔板设计使氦气冷却回路容易实现, 增殖流道简单, 可简化制造工艺, 提高可靠性。同其他液态锂铅包层相比, DLL 包层在冷却剂系统、制造、装配上可成就较高的可行性。

关键词: 聚变发电反应堆; 包层模块; 结构方案; 机械连接

中图分类号: TL642 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0918(2005)01-0091-05

Structural design and analysis of dual-cooled lithium-lead blanket module for the fusion power reactor FDS-II

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 structural scheme of Dual-cooled Lithium Lead (DLL) blanket module has been proposed for the fusion power reactor (named FDS-II), whose basic concept is to use RAFM steel (e. g. CLAM steel) as structural material, liquid metal LiPb as both coolant and breeder, and SiCf/SiC composite material as flow channel inserts which serves as electrical and thermal insulators. In particular, the structure configuration of the blanket module is integrated considering breeding zone, channels of coolant, mechanical connections, maintenance, etc. Furthermore, the introduction of “}]” shape steel grids have two advantages: simplifying the coolant channels which is to be easily implemented, simplifying manufacturing processes and enhancing the reliability. The

收稿日期: 2004-12-11; 修回日期: 2005-01-21

基金项目: 中科院知识创新工程项目, 国家自然科学基金项目

作者简介: 刘松林(1967—), 男, 河北人, 副研究员, 2003 年获合肥工业大学计算机应用专业硕士学位, 研究方向为反应堆结构与虚拟现实仿真

DLL blanket may achieve higher availability in coolant system, manufacturing and assembly compared with other liquid metal lithium-lead blankets.

Key words: fusion power reactor; blanket module; structural design; mechanical connection

FDS-II 是中国科学院等离子体物理研究所 FDS(Fusion Design Study)课题组继聚变驱动次临界堆系统(FDS-I)^[1]后正在研究、发展的聚变发电反应堆^[2],其目标是在建造商用堆电站以前展示高性能的增殖包层,高效的发电系统,成就较好的维护性,较少的放射性废物扩散。而增殖包层(He/LiPb Dual-cooled Lithium-Lead Breeder Blanket, DLL)是其主要候选包层概念。

先进的 DLL 是 FDS-II 首选方案,是其关键部件。其结构方案设计的目标和要求为:①实现氦增殖($TBR > 1$);②排出聚变产生的核热,有高的热效等;③满足磁体的有效屏蔽;④满足结构材料机械性能和热限制的要求;⑤结构坚固可靠,在事故状况下能抵御外力作用;⑥结构简单,方便加工制造,性能可靠;⑦连接与固定应满足远程维修机械操作;⑧在既有的制造技术和外推技术条件下确保设计的一致性。

为满足氦增殖,获得高的热效,经过调研^[3~5]分析,DLL 包层以低活化马氏体钢(RAFM steel-e.g. CLAM steel)为结构材料,采用液态金属 LiPb 作为增殖材料和冷却剂,氦气作为结构墙板的冷却剂,使用碳化硅流道插件作为电绝缘和热绝缘,减小 MHD 压降,最大限度地提高冷却剂的出口温度(液态金属 LiPb 的出口温度约达 700 °C)。

本文以实现 DLL 的目标和原则为出发点,在对国际聚变包层概念结构进行广泛调研、理解、分析比较的基础上,首先确定 DLL 包层为大模块的基本形式;在 DLL 物理功能、工程概念实现的可行性、可靠性、经济性等方面综合考虑、分析、比较给出 DLL 包层标准模块的结构设计方案。同欧洲 DC 包层支撑隔板氦气和增殖区 LiPb 供给不易实现,美国 ARIES-ST 结构支撑隔板氦气回路复杂,制造可行性低,包层的机械连接未能考虑相比,DLL 包层从增殖

区、冷却剂流道、屏蔽包层、母管、机械连接到维修装配全局考虑包层结构设计,使 DLL 包层结构布置完整全面;独有的“ Γ ”形隔板设计使氦气冷却回路容易实现,增殖流道简单,可简化制造工艺,提高制造可靠性,整个结构在冷却剂系统、制造、装配上成就较高的可行性。

1 DLL 包层基本结构分析与选择

目前包层的基本形式有“香蕉形”整体扇段和模块式两类。“香蕉形”包层更换时不考虑堆内更换而是整体移出,环径比高,但整体扇段体积庞大、吨位重,起重运输装备要求高,制造加工困难,造价高,包层维修更换一般需要切割真空室,甚至纵场线圈,破坏堆的结构,易造成环境污染,维修时间长,包层的维护、更换成本较高,如欧洲 WCLL^[6]包层;美国 ARIES-RS、AT^[7,8],日本 CREST^[9]为不需要切割真空室和纵场线圈,避免堆内放射性灰尘流出,缩短维修时间,提出堆内每扇段部件(包层、偏滤器)整体从大水平窗口移出维护、更换,这样做的代价是需要建造大尺寸的纵场线圈(TF)和极向场线圈(PF),增大堆建筑物空间,以获得更换包层时所需的大尺寸水平窗口,维修起重运输装备要求高,堆的初期建设成本非常高。大模块式包层主要从减小热应力和故障时的电磁力考虑^[10],它在堆内更换,但需要较大的安装空间,在相同大半径下,需要加大小半径的尺寸,减低环径比,其维护时不破坏堆的结构,单块包层吨位小,适合远程维护机械操作,维护更换时间短,成本最低。ITER^[11~13]采用小模块结构,相关的试验研究正在进行中,其成功的技术和经验可以借鉴在示范堆上,欧洲基于当前或近期发展可实现的目标参照 ITER 方案,其聚变电站 PPCS-MODEL-D 包层采用大模块的形式^[14]。

综合 FDS-II 堆芯参数、建设维护成本、减小热应力和故障时的电磁力以及成就包层的设

计目标和原则要求等数个方面的考虑, FDS-II 包层参照欧洲 A-DC 包层和 ITER 屏蔽包层采用大模块框架布置。一个在赤道圆环平面上的 DLL 外包层标准模块显示在图 1 中, 尺寸为 1.2 m(径) × 2.2 m(环) × 2 m(极)。其他包层模块的结构设计可参照该模块设计思路和布置形式, 区别在于在等离子体位形曲线周向上不同位置的大模块尺寸、体积、质量各不相同, 即每个模块内 LiPb 流道数、流道尺寸、隔板尺寸等有所不同, 如第四部分所述的内包层模块。

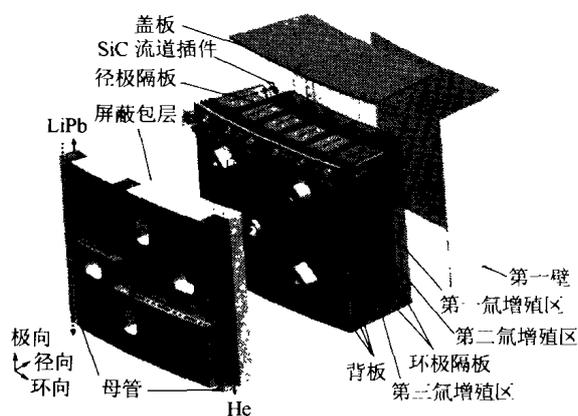


图 1 DLL 外包层标准模块

Fig. 1 DLL equatorial outboard blanket module

2 DLL 外包层标准模块的结构设计

由于包层径向上结构材料受辐照损伤的年限长短不一, 从经济上考虑可分期进行更换, 为最大限度地提高不同结构部件的使用寿命, 降低维护更换成本, 减少浪费, DLL 包层结构设计成分体形式, 在径向分成可更换模块(由工作包层组成, 即第一壁、氦增殖区和氦气联箱)和永久模块(由屏蔽包层组成, 与堆同寿命)两截, 后者与堆同寿命, 前者在堆内由远程维护机械安装、拆卸。

2.1 可拆卸模块的结构

2.1.1 增殖区布置与 LiPb 回路流道设计

根据 DLL 所要实现的功能, 其增殖区由等离子体内部向外部按径向划分成: 第一壁、第一氦增殖区((LiPb1), LL1)、第二氦增殖区(LL2)、第三氦增殖区(LL3)、氦气联箱区的径向布置, 即由第一壁(FW)、焊接到 FW 内墙上

的环极向隔板(toroidal poloidal Stiffening Plates, tpSP)、径极隔板(radial poloidal Stiffening Plates, rpSP)构成坚固的增殖盒, 形成三排极向 LiPb 流道, 内插 SiC 流道插件, 分别为 LL1 区、LL2 区、LL3 区, 这样布置使流道结构简单, 提高包层的可靠性; 另外随结构材料 R&D 新成果, 结构材料与液态 LiPb 有更高的相融温度, 那么在不根本改变结构设计, 仅少量增加 tpSP 或 rpSP, 不用 SiC 流道插件解决 MHD 问题, 即可成就 FDS-II 单冷锂铅增殖包层概念 SLL(He-Cooled Quasi-Static Lithium-Lead Breeder Blanket), 这样既确保了设计的一致性, 又可简化辅助系统和包层的制造工艺。关于这点尚在进一步进行热工水力学校核验证。

DLL 流动方案简单。冷的液态金属从顶部 LiPb 供收集分配单元供给口流入 LL1 区流道, 自顶向下流动, 到底部再 U 型拐弯, 流入 LL2、LL3 区, 自下而上流动, 在顶部 LiPb 供收集分配单元收集口汇集, 流出包层。PbLi 逆流的形式, 可均匀包层模块上下的温度场分布。LL1、LL2、LL3 区非等截面、一进二出的布置方式, 粗略调节 LiPb 在 LL1、LL2、LL3 区内流动速度, 使冷的 LiPb 以较高的流速在 LL1 区流动, 带走大量中子在 LL1 区沉积的热量, 以慢速流过 LL2、LL3 区内流道, 较易得到高的出口温度。见图 2。

2.1.2 氦冷却供给设计

为排除包层结构核热, 增殖区全结构冷却方案对 DLL 包层设计是一个挑战, 与经典结构布置不同之处在于 DLL 包层结构部件不是直接由高压氦气母管供给、收集, 而是在 LL3 区后, 由四块大的背板(BP)与 FW 的两个边墙焊接, 形成一个独立的三级氦气联箱, 作为氦气供给的中间过渡, 氦气联箱由屏蔽包层后部的同心母管供给, 背板之间在径向安装有加强凸台, 保证联箱在高的氦气压(8 MPa)下有足够的强度。FW、SP、Cover 内加工有氦气流道, 流道进出口布置在它们的后部, 分别连接氦气联箱。这样布置简化氦气联箱的设计和制造工艺, 容易实现结构材料的冷却方案。BP 可兼作 DLL 包层的高温热屏蔽。

氦气在 DLL 中流动回路为:冷的氦气经进口连接管流入包层后部第一级联箱,全部流入 FW,在 FW 的平行流道中带走大量的表面热流,冷却 FW 后,氦气从 FW 回到第二级联箱进行再分配,分别流入径极向隔板、环极向隔板和上、下盖板,带走隔板和盖板中的热量,回到第三级联箱,由该级联箱汇集后由出口管排出,详见图 2。

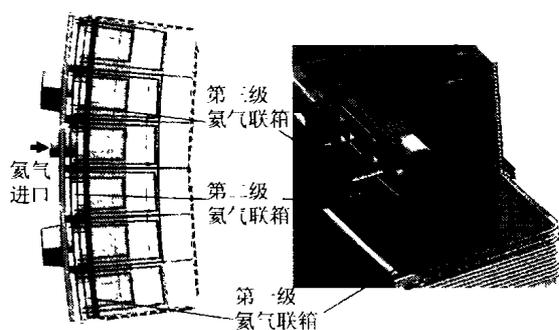


图 2 DLL 氦气冷却回路

Fig. 2 DLL He-coolant flowing

2.1.3 第一壁(FW)设计

FW 采用 HIP 技术加工成内有矩形流道的钢板,再弯曲成 U 型,流道进出口在边墙后部。FW 结构上氦气管道设计成水平“U”,每组“U”形之间左右相互交替,均衡 FW 结构温度,减小热应力,还可增强氦气带走结构核热能,提高氦气出口温度。

2.1.4 隔板(SP)设计

SP 主要起结构支撑,同时带走结构核热,其设计直接关系到包层 He 冷却回路实现的可行性和制备工艺复杂度,是包层结构设计的又一关键。DLL 包层 SP 设计独特之处在于它结合了氦气联箱方案,创新地提出 tpSP “ Γ ”形设计,采用 HIP 技术加工、再弯曲成“ Γ ”形,每块隔板上设计有 1 组 U 形流道,冷却管道设计成 15 排平行流动方式。该结构解决了经典(如欧洲 A-DC,美国 ARIES-ST)“ Γ ”形 tpSP 供气回路实现复杂、困难的难题,避免了 tpSP 与“ Γ ”形 rpSP 之间供气流道之间对接时的焊接难题,使 tpSP 和 rpSP 氦气流道各自独立,互不影响,增强了结构及氦气供给系统的可靠性、可行性。

2.2 永久模块设计

为了节约成本、减小包层模块质量,DLL 将屏蔽包层设计成永久模块,与真空室同寿命。它在功能上既要屏蔽中子,保护堆外的电磁线圈,又要为可更换模块提供支撑基座。其采用铆钉连接固定在真空室上,其后部键槽与真空室上特殊键配合抗堆事故时电磁力作用。氦气母管、LiPb 母管是聚变堆独立供给、收集系统,采用外矩形内圆形的同心管结构,其主母管及到每个包层的分支母管嵌入屏蔽包层后部的凹槽中。

由于需要在屏蔽包层上开键槽,供给分支母管在径向要贯穿屏蔽等结构布置,造成屏蔽包层局部厚度减薄、甚至贯穿现象,这是包层由后部母管供给方式下普遍存在的问题,如 ITER 水冷屏蔽包层,这只有靠真空室进一步交叉堵漏来弥补。通过中子学校核可以满足屏蔽要求^[15]。

3 包层分体部件间机械连接设计

包层的机械固定连接、拆卸、母管连接虽说是包层的附属功能,但对包层的空间布置、结构、功能都有一定影响,是包层结构设计不容忽视的一个重要部分。它涉及与真空室连接固定,分体包层还涉及可拆卸模块与永久模块间的连接,以及包层的氦气、LiPb 系统与永久母管的焊接连接。DLL 包层的机械连接设计强调设计的可靠性、可行性,对包层其他结构、增殖功能的影响小。

3.1 可更换模块的固定连接

包层可更换模块通过螺栓连接或铆钉连接固定在永久模块上。本方案选用螺栓连接的方式,如图 3 所示。为抗堆事故时引起的电磁力对包层模块的扭力作用,在可更换模块与永久模块之间设置四个大的矩形键、键槽配合,对角布置。为节约空间,键、槽位置同时作为拴接的位置。

远程维护工具需从等离子体侧对包层进行安装、拆卸,同心中空管为远程维护工具提供操作的通路。包层正常工作时同心中空管两端焊接密封锁板,其内、外管分别与氦气联箱相接,使冷的氦气流经同心管,起冷却保护作用,以免

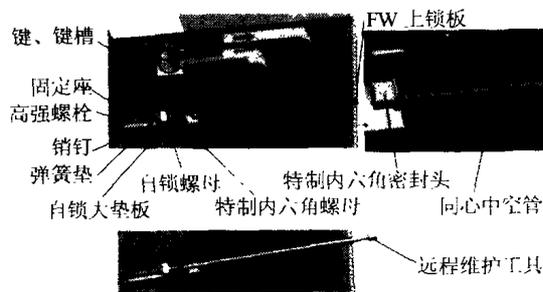


图3 可更换模块与永久模块的固定连接方案

Fig. 3 Mechanical connections between exchangeable part and a lifetime part

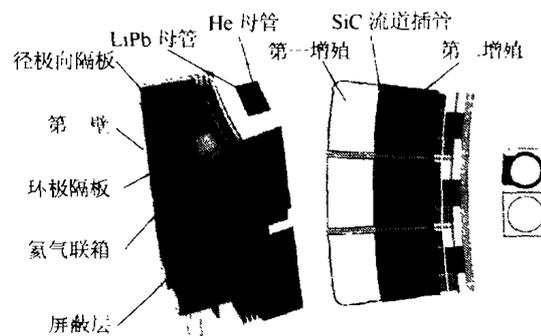


图4 DLL 内包层标准模块

Fig. 4 DLL equatorial blanket module

其浸在高温 LiPb 中发生高温变形。维修时，切割下密封锁板，远程维护工具可通过内管伸入到连接位置拆、装螺母。

连接装置进一步的机械校核工作将在后续工作中展开。

3.2 氦气、锂铅母管拆卸连接

氦气、锂铅母管皆在包层永久模块的后部，为使氦气母管、锂铅母管能与包层模块上的支管连接，适合远程维修工具从等离子侧进行操作，同包层模块固定方式相似，选用同心中空管的结构。包层在工作时，有冷的氦气流经同心管，起冷却保护作用，维修时，切割下密封锁板，就可作为维修路径。

4 内包层标准模块结构设计

DLL 内包层与外包层结构近似且简单(见图4)，分为 FW、氦增殖区、氦气联箱、屏蔽包层。氦增殖区中有两排 LiPb 流道，紧靠 FW 第一排由上而下流动，折弯在第二排由下至上流动。这样两排 LM 流道逆流形式，是为了均匀内包层上、下温度场，减小内包层模块总体结构应力。FW、增殖区以及冷却隔板的流道与外包层相应结构设计相似。

5 结论

DLL 包层是根据现有知识和技术外推的、成就较高性能参数的包层结构，选用大模块结构形式，包层在径向上又分成可更换模块和永久模块两截，更换维护成本低，从整个堆的角度考虑经济性好。DLL 包层从 FW、增殖区、流

道、屏蔽包层、母管、机械连接到维修装配全局功能上考虑包层结构设计，设计方案完整。DLL 包层创新的“]”形 rpSP 隔板设计结合大的氦气联箱设计，巧妙解决隔板(SP)间大量冷却流道对接焊接难题，使 tpSP 和 rpSP 氦气流道各自独立，互不影响，增强了结构及氦气供给系统的可靠性、可行性，简化了加工工艺。DLL 装配、拆卸充分考虑了远程维护装置的操作，操作通道中空管增加了氦冷设计，增强其耐高温能力。整个结构在物理功能和工程概念的实现上可行性、可操作性强，尤其在冷却剂系统、制造、装配上可成就较高的可行性。

但是，结构仍存在方案设计与工程实现的问题，这些挑战性的问题还有待进一步研究，如 SiC 流道插件的制造加工问题，在流道内如何固定；隔板的优化有待进一步进行等。

参考文献：

- [1] 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,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.
- [3] Wu Y C, et al. The Fusion-driven hybrid system and its material selection [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 207~311: 1629~2636.
- [4] Prachai Norajitra, et al. The EU advanced dual coolant blanket concept [J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61~62: 449~453.
- [5] Tillack M S, et al. Fusion power core engineering for the ARIES-ST power plant [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 65: 215~261.
- [6] Futterer M A, et al. Further improvements of the wa-

- ter-cooled Pb-17Li blanket [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 58-59 : 523~527.
- [7] Malang S, et al, ARIES-RS maintenance approach for high availability [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1998, 377~383.
- [8] Lester M. Waganer, ARIES-AT Maintenance System Definition and Analysis, <http://www-ferp.ucsd.edu/ARIES/DOCS/FEATURED/at-anim.shtml>.
- [9] Yoshiyuki Asaoka, et al. Maintenance and radiation protection issues of the CREST reactor [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, 51~52 : 461~461
- [10] Norajitra P, et al. Conceptual design of the dual-coolant blanket within the frame of the EU power plant conceptual study[R]. final report, FZKA 6780, 2003.
- [11] Ioki K, et al. Progress on design and R&D of ITER FW/blanket [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2002, 61~62 : 399~405.
- [12] Elio F, et al. Design and R&D progress of blanket attachments [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, 69: 321~326.
- [13] Shibanuma K, ITER R&D; Remote Handling Systems; Blanket Remote Handling Systems [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 55: 249~257.
- [14] Norajitra P, et al. Conceptual design of the dual-coolant blanket within the frame of the EU power plant conceptual study[R]. final report, FZKA 6780, 2003.
- [15] 李静惊,等. 聚变发电反应堆 FDS-II 中子学设计与分析 [J]. *核科学与工程*, 2005, 25 (1):86~90.