

聚变发电反应堆双冷锂铅包层 结构温度和应力计算分析

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: 使用有限元程序对聚变发电反应堆 FDS-II 双冷锂铅包层结构进行数值模拟, 依据结构设计、热工水力学参数和中子学计算参数, 给出对应包层结构温度场和应力场分布, 同时分析了液态金属 LiPb 碳化硅流道插件的温度、应力及变形。依据温度场和应力场模拟结果, 对 FDS-II 双冷锂铅包层设计方案在等离子体稳态运行条件下进行可行性分析。

关键词: 聚变发电反应堆; 温度场; 应力场

中图分类号: TL64.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0918(2005)02-0174-04

Temperature and stress calculation and analysis on the dual-cooled lithium-lead breeder blanket structure for the fusion power reactor FDS- II

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 the dual-cooled lithium-lead breeder blanket structure for the fusion power reactor (named FDS-II). The temperature and stress field have been presented for the whole blanket structure on the basis of the structure design, the thermal-hydraulic design and the neutronics design. The temperature field, stress field, thermal deformation of SiC_f/SiC FCI in the liquid metal LiPb flow channel have been also presented. The feasibility of the DLL blanket structure design of FDS-II has been analyzed based on the above results.

Key words: fusion power reactor; temperature field; stress field

聚变发电反应堆 FDS-II 主候选包层 DLL (Dual-cooled Lithium-Lead Breeder Blanket) 概念设计采用高压氦气/液态金属 LiPb 双冷却系统, 氦气系统冷却包层结构, 液态金属

收稿日期: 2005-03-25; 修回日期: 2005-05-16

作者简介: 陈红丽 (1968—), 女, 安徽人, 副教授, 1989 年毕业于西安交通大学无线电专业, 现为中科院等离子体物理研究所博士生, 从事聚变反应堆结构、电磁分析研究

LiPb 自冷排热,同时作为氦增殖剂。为减小液态金属 LiPb 的 MHD 压降,选用碳化硅流道插件作为电绝缘和热绝缘方案,由于液态金属 LiPb 与碳化硅兼容温度远大于结构材料低活化马氏体钢(RAFM steel 如 CLAM steel^[5])最大温度限制,因此可以提高冷却剂 LiPb 出口温度,增大包层热转换效率,提升聚变发电的经济性。

FDS-II 包层概念结构设计、中子学计算分析以及包层热工水力学计算分析见参考文献[1~4],本文在结构设计、中子学核热计算和热工水力学参数基础上,针对 FDS-II 包层概念结构设计 DLL 方案进行结构温度和应力的可靠性分析,详细研究氦气系统和液态金属 LiPb 实际载热能力,利用商用有限元分析软件 ANSYS 对 DLL 包层结构第一壁(FW)、隔板(SP)以及碳化硅流道插件进行数值模拟计算,验证该种结构设计是否满足包层结构材料要求。

1 包层结构计算分析与优化

1.1 包层结构三维模型

图 1 所示为 DLL 包层的三维结构计算模型,由于实际的包层模型近似为梯形,为简化计算,模型建造为梯形,由于包层的结构环向对称,因此选取结构的 1/2 进行模拟。DLL 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 的四个氦气流道,且上、下流道均为半流道,并取在靠近第一增殖区 LiPb 流道下部转弯处(LiPb 温度约为 650 °C)^[4]。

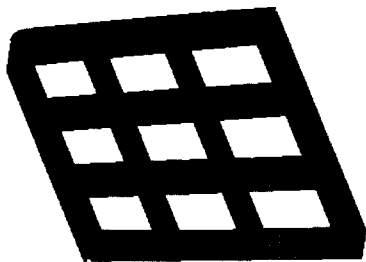


图 1 DLL 三维计算模型
Fig. 1 3-D model of DLL

1.2 边界条件

热工水力学参数见文献[4],结构功率密度参考中子学计算结果,增殖区核热完全依靠自冷排热,氦气携带 FW、隔板及碳化硅与结构缝隙中 LiPb 核热,模型各流道温度可以由功率平衡计算得到,堆在正常稳态运行时电磁载荷很小,可以不予考虑。

1.3 计算结果

对 DLL 包层三维模型使用有限元程序 ANSYS 进行分析,获得包层结构温度场及应力场的分布,如图 2 所示,最大温度 565 °C 出现在 FW 的前壁,超过结构材料最大温度 550 °C 限制。因此第一壁结构设计不能满足热工和材料的要求,有必要对第一壁结构进行优化设计。

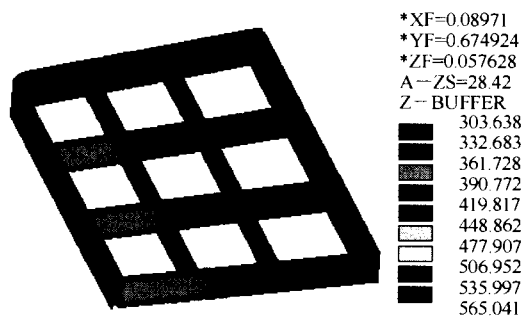


图 2 DLL 模块结构温度分布
Fig. 2 Temperature field for DLL model

1.4 第一壁结构优化分析

由于结构最大温度出现在 FW 面向等离子区的流道转弯处,因此采用该处二维截面模型(见图 3)对 FW 的前壁进行更细致优化。改变 FW 前壁厚度,得到厚度与最大温度之间的关系,如图 4 所示,当前壁厚度减小为 3 mm 时,最大温度 543 °C,满足结构材料最大温度允许限制,因此结构优化设计方案可以采用降低 FW 厚度或改用更耐高温的材料,由于 FW 面向等离子区,考虑 FW 的厚度对结构安全性的影响,建议在不改变第一壁厚度的条件下使用耐高温的材料。因此优化方案设想在 FW 的前壁挂一层导热性能好且耐高温的 ODS 钢(对应于结构材料)或者 W 合金,或者整个 FW 结构材料选用 ODS 钢。

对一种优化结构(前壁采用 3 mm 的

RAFM 钢外挂 1 mm ODS 钢)进行 FW 二维结构分析,二维模型仍选择在 FW 结构转弯处,计算的最大温度 557 °C 出现在 FW 前壁区域,满足 ODS 钢最大允许工作温度 650 °C 限制。计算的最大应力出现在前壁流道倒角处为 333 MPa,此处对应温度为 370 °C,该温度下允许应力极限为 476 MPa,如图 5 所示,这种优化结构可以满足材料温度和应力可靠性要求。该结构材料由于热膨胀存在一定的应变约 5 %,FW 径向、极向热膨胀最大相对位移分别约为 0.17、0.5 mm,因此结构设计时包层模块之间应留有一定的缝隙。

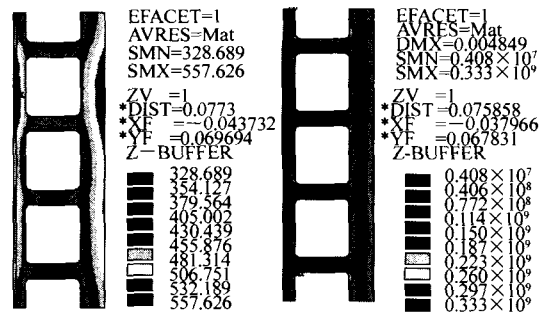


图 5 FW 结构温度与应力场
Fig. 5 Temperature and Von Mesis Stress field of FW

2 碳化硅流道插件计算与分析

2.1 几何模型

为了更详细地分析 DLL 结构中碳化硅流道插件的温度和应力场,选择 2-D 模型作为计算模型。考虑各区 LiPb 流道的相似性,为简化计算,选择每区的一个 LiPb 流道作为计算模型,如图 6 所示,并选择在接近 LiPb 流道出口处,因为此处 LiPb 温度最高约 700 °C,对应碳化硅的温度最高,热应力与热变形较大。

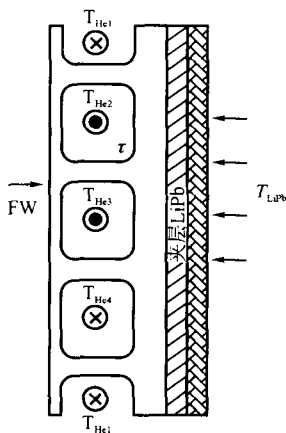


图 3 FW 温度与应力二维分析模型
Fig. 3 2-D FW model for temperature and Von Mesis Stress calculation



图 6 碳化硅插件二维计算模型
Fig. 6 2-D model of SiC_i/SiC

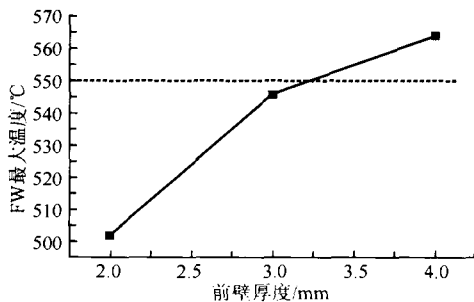


图 4 前壁厚度与最大温度关系
Fig. 4 Max. temperature as a function of front wall thickness

2.2 计算结果

依据热工水力学参数和中子学计算结果,对 DLL 二维模型进行有限元分析,获得包层结构中碳化硅流道插件的温度场的分布,其中最大温度出现在中间流道上,如图 7 所示,主要是此流道 LiPb 出口温度高且功率密度高于 LiPb 流道 3 区,最高温度 653 °C。进一步分析该流道插件热应力和热变形,假设没有约束情况下热应力只有 6 MPa,如图 7 所示,而在径向方向热膨胀最大相对位移约 7 mm,在环向方向热膨胀最大相对位移约 4 mm,均小于空间 10 mm

限制,满足碳化硅流道温度、应力和空间要求。

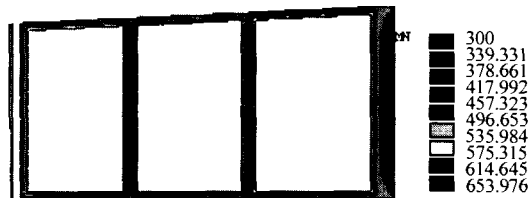


图7 LiPb流道碳化硅插件温度分布

Fig. 7 Temperature field of SiC FCIs for LiPb flow

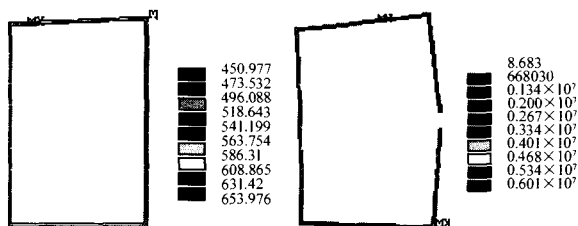


图8 LiPb流道2碳化硅插件温度和应力分布

Fig. 8 Temperature and Stress field of SiC FCIs for LiPb flow 2

3 结论

DLL包层结构模型模拟结果显示,基本结构设计方案FW前壁为4 mm的RAFM钢不满足热工和材料的要求。通过对FW结构进行优化分析,发现减小第一壁厚度或改用更耐高温的材料作为第一壁材料可以满足材料温度限制。考虑到第一壁厚度对结构安全性的影响,建议在不改变第一壁厚度的条件下使用耐高温的材料,优化方案采用在FW的前壁挂一层导热性能好且耐高温的ODS钢(对应于结构材料)或者W合金,或者整个FW结构材料选

用ODS钢。对其中一种优化结构(前壁采用3 mm的RAFM钢外挂1 mm ODS钢)进行FW模拟分析,结果显示这种优化结构可以满足材料温度和应力可靠性要求。

碳化硅插件在流道2中温度最高,温差最大,最高温度653℃,小于碳化硅最高允许温度1000℃,热应力只有6 MPa,小于最高允许190 MPa,而在径向方向热膨胀最大相对位移约7 mm,在环向方向热膨胀最大相对位移约4 mm,均小于空间10 mm限制,满足碳化硅流道温度、应力和空间要求。由于碳化硅插件在流道中安装技术尚在研究,计算应力时是假设完全没有约束情况下进行的,因此碳化硅插件应力计算结果仅作为参考。

以上计算结果只是模拟等离子体稳态运行下包层结构的温度和应力分布,没有考虑反应堆在启动、关闭以及改变功率情况下包层材料所受的热冲击,也没有考虑等离子体破裂、冷却剂失冷失流等各种事故以及辐照损伤等因素,因此本文结论有一定的局限性,下一步需对包层结构进行瞬态安全分析和事故下安全分析。

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FDS-II包层模块结构设计与分析[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1):91~96.
- [3] 李静惊,等. 聚变发电反应示范堆FDS-II中子学设计与分析[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1):86~90.
- [4] 汪卫华,等. 聚变发电反应堆双冷锂铅包层热工水力学设计与分析[J]. 核科学与工程, 2005, 25(2):163~168.
- [5] 黄群英,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.