

CFETR 氦冷固态包层设计及多物理场耦合特性研究

苏光辉, 崔世杰, 连强, 刘志鹏, 张明昊, 张魁, 张大林, 田文喜
西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049

Email: ghsu@mail.xjtu.edu.cn

摘要: 以 CFETR HCSB 包层为研究对象, 针对其物理-热工耦合的关键问题进行研究。基于点-点插值法, 采用简化的一维中子学和二维热工水力学计算模型, 通过数据交换接口实现中子输运程序 MCNP 与计算流体动力学软件 CFX 之间的耦合, 开发了适用于 CFETR HCSB 包层的中子学-热工水力学耦合优化分析程序 NTCOC。针对开发得到的 NTCOC 程序进行了相关验证, 包括: (1) 程序适用性验证; (2) 物理-热工分析程序间数据传递准确性验证; (3) 增殖剂单元初始插入厚度的无关性验证; (4) 包层三维中子学、三维热工水力学和三维应力学分析及验证。验证耦合程序的适用性、高效性以及可靠性。

针对 CFETR Phase I HCSB 中沿极向布置的 15 组包层模块均进行了正常工况下的中子学-热工水力学耦合径向结构优化设计, 计算得到了全部包层模块的最佳径向结构布置方案。以此为基础研究了不同包层模块中各球床最终优化径向厚度随中子壁负载的变化规律, 获得了 CFETR HCSB 包层耦合优化设计规律。将全堆中子学模型中沿极向布置的 15 组包层模块内部各球床的径向尺寸均由初始值替换成最终优化得到的各包层径向结构布置方案, 得到优化后的全堆中子学模型。以此为基础进行全堆中子学分析, 计算结果显示, 通过对 15 组包层模块进行径向结构优化设计, CFETR 全堆 TBR 由原先的 1.092 上升至 1.266, 可以良好地满足氦自持需求。基于上述工作, 总结提出了一套高效准确且适用于 CFETR HCSB 包层的“3D→1D&2D→3D→3D”耦合优化设计集成方法。

针对 CFETR Phase II HCSB 包层, 进行了基本的结构设计与材料选取。将压降限制纳入优化准则, 对原先的优化方法进行了改进, 基于改进后的算法优化得到的中子学-热工水力学性能综合最优的包层方案可以同时满足包层压降限制。在此基础上, 针对 Phase II 典型包层模块开展了三维热工修正后的径向结构优化设计。针对高聚变功率条件下采用传统方法计算得到的包层方案存在的氦增殖性能优化不充分等问题, 提出了在优化过程中加入动态反馈的改进方案, 有效地改善了 Phase II 包层的氦增殖性能, 同时使得增殖区温度分布更加合理, 良好地解决了上述问题。针对 Phase II 中除典型包层模块外的其他所有包层模块也都进行了中子学-热工水力学耦合径向结构优化设计, 计算得到了 Phase II 全部包层模块的最佳径向结构布置方案。将 Phase II 全堆中子学模型中沿极向布置的 11 组包层模块内部各球床的径向尺寸分别设置成最终优化得到的各包层最佳径向结构布置方案, 得到优化后的 Phase II 全堆中子学模型。基于该模型对其进行全堆中子学性能分析, 计算结果显示最终优化的 Phase II 全堆 TBR 为 1.182, 可以良好地满足氦自持需求。

本文的研究工作对于 CFETR 氦冷固态包层的设计优化和物理-热工耦合分析研究有借鉴意义, 也可为其他固态包层的设计和分析提供参考。

关键词: 中国聚变工程实验堆; 氦冷固态包层; 物理-热工耦合; 结构优化设计

基金项目: 国家重点研发计划磁约束核聚变能研究专项 (编号: 2017YFE0302100) 资助。