

中国聚变工程实验堆 CFETR 偏滤器的物理设计进展

丁锐¹, 潘宇东², 刘晓菊¹, 桑超峰³, 夏天阳¹, 王亮¹, 司杭¹, 贾国章¹, 毛世峰⁴, 谢海⁵, 徐国梁⁵, 李长君¹, 杜海龙², 念飞飞¹, 杨钟时¹, 刘道远³, 李泽宇^{4,6}, 李娜咪³, 李航¹, 朱大焕¹, 周庆瑞³, 陈锡熊⁴, 李建刚¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²中核集团核工业西南物理研究院, 成都 610225

³大连理工大学, 大连 116024

⁴中国科学技术大学, 合肥 230026

⁵深圳大学, 深圳 518061

⁶北京大学, 北京 100871

Email: rding@ipp.ac.cn

摘要: 我国已经正式启动了中国聚变工程实验堆 CFETR 的物理与工程设计, 其科学目标是实现 GW 级功率的聚变能并且保证氙的自持, 为未来聚变电站的建设提供科学和技术基础 [1]。在 CFETR 的设计中, 偏滤器是最关键的部件之一, 由于直接面对高能量和高通量的等离子体轰击, 偏滤器的服役环境是最为恶劣的。与正在法国建造中的国际热核聚变堆 ITER 相比, CFETR 的聚变功率是 ITER 的两倍, 每年运行的 duty cycle 将超过 30%, 因此 CFETR 偏滤器设计的难度和挑战是前所未有的。

CFETR 偏滤器面向等离子体材料将选择钨基材料, 为了保证其在高功率和长服役时间下的使用寿命, 在物理设计上必须将到达偏滤器靶板的稳态峰值热流控制在 $10\text{MW}/\text{m}^2$ 以下, 同时钨材料的腐蚀速率接近 0。由于钨杂质在边界等离子体的辐射基本可以忽略, 因此必须主动在偏滤器内注入具有强辐射能力的杂质气体, 如氖 (Ne), 氩 (Ar) 等, 才能通过辐射能量损失的方式降低到达偏滤器靶板的热流。另一方面为了保证芯部等离子体性能, 在降低热流的同时必须有效控制芯部杂质的水平。

基于目前 CFETR 的磁场位形, 我们成功设计了下单零的具有垂直靶板结构的常规偏滤器位型, 这种结构很容易实现打击点处的等离子体脱靶。为了增加偏滤器区的辐射损失, 其 X 点到内外打击点的长度即偏滤器腿长大大超过了 ITER, 同时多个参数与 ITER 相比都有利于降低靶板的峰值热负荷, 主要包括磁力线与偏滤器靶板之间的极向夹角较小, 极向磁扩展因子较大, 打击点处的大半径较大。考虑到不同的实验和模拟研究给出的中平面热流衰减宽度预测大小, CFETR 偏滤器靶板的稳态峰值热流与 ITER 非常接近。我们采用 SOLPS 程序对常规偏滤器条件下不同杂质的注入进行了模拟研究, 发现 Ne 杂质相对于 Ar 杂质与芯部的兼容性更好。在 Ne 杂质注入率为 $1.0 \times 10^{20}/\text{s}$ 时, 内外偏滤器靶板均处于部分脱靶状态。稳态热流低于 $6\text{MW}/\text{m}^2$, 其贡献主要来自于辐射热。模拟表明从上游注入氩气可以显著提高边界的等离子体密度, 从而增强杂质屏蔽能力, 同时也可以有效降低偏滤器靶板的净腐蚀速率, 因此这种运行模式基本满足偏滤器物理设计的要求。模拟还发现增加偏滤器腿长可以有效增强辐射偏滤器能力, 因此需要考虑工程限制的同时尽可能地增加偏滤器腿长。虽然先进小角型偏滤器 SAS 结构可以更好地聚积中性粒子, 从而较好控制远刮削层区等离子体温度, 但是能否作为未来偏滤器解决方案仍需要进一步评估。

关键词: 聚变堆; CFETR; 偏滤器; 热负荷

参考文献

[1] G. Zhuang *et al.*, Progress of the CFETR design, *Nuclear Fusion*. 2019, 59, 112010.

基金项目: 国家重点研发计划 (NO. 2017YFE0300500, 2017YFE0300501)