

面向聚变堆的 EAST 和 DIII-D 偏滤器脱靶反馈控制联合研究最新进展

王亮^{1,*}, 汪惠乾^{1,2}, 袁旗平¹, 李克栋¹, 吴凯¹, 许吉祥¹, 刘建斌¹, 孟令义¹, 段艳敏¹, 张斌¹, 曹斌¹, 杨钟时¹, 丁芳¹, 张凌¹, 丁锐¹, 徐国盛¹, 肖炳甲¹, 罗广南¹, 龚先祖¹, 万宝年¹, 李建刚¹, D. Eldon², H. Y. Guo², J. Barr², A. W. Leonard², A. Hyatt², D. Thomas², D. Humphreys² and A. M. Garofalo²

¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²General Atomics, P. O. Box 85608, San Diego, CA 92186, USA

*E-mail: lwang@ipp.ac.cn

摘要: 偏滤器靶板超高热流以及钨杂质溅射的控制是 EAST 和未来 ITER、CFETR 稳态运行面临的严峻挑战。国际聚变界普遍认可偏滤器脱靶是稳定控制等离子体与壁相互作用最为有效的途径。2016 年以来, EAST 在 ITER-like 水冷钨偏滤器运行条件下, 长脉冲 H 模脱靶的主动反馈控制上取得了系列重大进展, 成功发展了多种长脉冲脱靶反馈控制的方法, 分别实现了辐射功率、偏滤器粒子流翻转、偏滤器电子温度 $<5\text{eV}$ 的主动反馈控制。利用偏滤器区域氖杂质、氩杂质气体的主动注入, 均达到了脱靶的稳定维持, 进而有效降低了偏滤器靶板的稳态热流并达到了对钨杂质源的有效抑制。更为重要的是, 在脱靶反馈控制的过程中, 中心等离子体的高约束性能得以很好的维持, H_{98} 超过 ITER 基本运行模式, 达到了偏滤器-中心等离子体的高度兼容。其中的辐射反馈控制热流、脱靶机理, 通过开展联合实验, 在美国 DIII-D 伴随内部输运垒的高 β_p 运行模式下得到了进一步的实验验证, 并于 2019 年 9 月利用脱靶度反馈实现了完全脱靶及其稳定控制, H_{98} 维持在 1.5, 成功拓展至更高参数区。图 1 分别给出了 EAST 上 H 模靶板 T_e 反馈(5eV)、DIII-D 上高 β_p 模式的辐射反馈控制脱靶的实验结果。

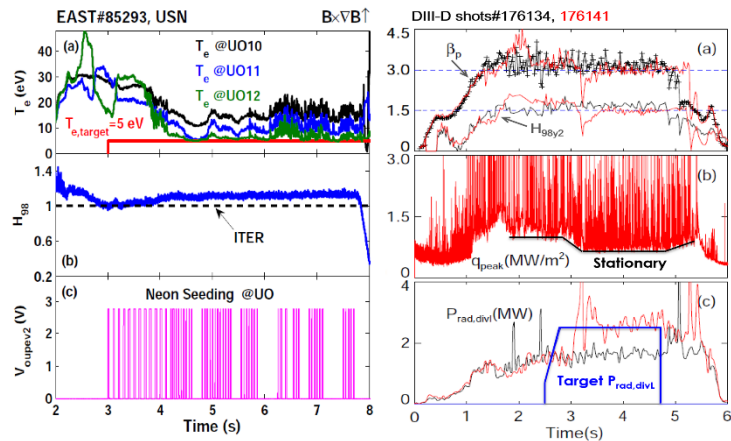


图 1. (左) EAST 采用偏滤器电子温度、(右) DIII-D 采用辐射偏滤器分别实现的 H 模脱靶反馈控制, 均与中心等离子体高度兼容。

EAST 还在不同脱靶度的条件下, 观察到一种稳定重复的、在脱靶-非脱靶之间周期性调制的 dithering 偏滤器状态, 类似的实验结果也在 DIII-D 上刚刚获得, 有望为聚变堆的稳态运行提供一种新的、具有应用前景的偏滤器状态。基于上面提到的三种偏滤器主动反馈控制方法, 还成功演示了“ T_e +辐射功率”的反馈控制模式。EAST 和 DIII-D 联合实验研究表明磁场梯度漂移 $B \times \nabla B$ 、偏滤器区域的电漂移 $E \times B$ 、封闭性以及粒子排除性能在脱靶的获得和稳定维持中起着非常重要的作用。这些最新的 H 模偏滤器脱靶主动控制联合研究进展及其物理机制的理解, 对 EAST 未来的高参数长脉冲 H 模运行、ITER 和 CFETR 的偏滤器-台基-芯部兼容集成提供了重要的科学参考。

关键词: 聚变堆, 偏滤器脱靶控制, EAST, DIII-D, H 模

[1] K. Wu, Q. P. Quan*, B. J. Xiao, L. Wang* et al., Nucl. Fusion 58, 056019 (2018)

[2] L. Wang* et al., Nucl. Fusion 59, 086036 (2019)

[3] J. B. Liu, L. Wang* et al., Nucl. Fusion (Accepted) [4] X. J. Liu*, L. Wang et al., Phys. Plasmas (Revised)

[5] L. Wang* et al., “Latest advances in active control of H-mode detachment and its physics on EAST for ITER/CFETR”, 3rd IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, 4–7 Nov, 2019 IAEA Headquarters, Vienna

[6] L. Wang*, H. Q. Wang et al., DIII-D Daily Morning Meeting, September 13, 2019 San Diego, USA

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2017YFE0301300)、国家优秀青年科学基金 (No. 11922513)。