

Grassy ELM 结合辐射偏滤器反馈控制——CFETR 高约束边界集成解决方案

徐国盛¹, 万宝年¹, 杨清泉¹, 袁旗平¹, 颜宁¹, 王一丰¹, 王亮¹, 徐学桥²

¹中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA

Email: gsxu@ipp.ac.cn

摘要: 大幅度边界局域模 (ELM) 是 CFETR 必须避免的; CFETR 将常规运行在辐射偏滤器条件下, 以缓解热负荷。因此 CFETR 需要: 1、没有大 ELM 而具有较强的杂质排出能力的高性能稳态 H 模边界; 2、不降低芯部约束性能的辐射偏滤器稳态运行。EAST 近期实验发现, Grassy ELM 运行模式与辐射偏滤器天然兼容, 可同时满足高约束、稳态、杂质排出能力强、热负荷得到缓解等需求, 从而为 CFETR 提供了一种非常有希望的高约束稳态边界集成解决方案。

Grassy ELM 是高功率加热下自发的高频小幅度 ELM。具有 Grassy ELM 的 H 模适用于聚变堆台基低碰撞率条件; 其较高的边界安全因子降低了等离子体发生大破裂的风险; 其较强的杂质排出能力特别适合实现高性能等离子体的稳态运行, 是 CFETR 等未来强磁场稳态聚变堆的候选运行模式。

EAST 在与未来聚变堆类似的金属壁、低旋转、电子主导加热等物理条件下, 稳定重复地实现了 Grassy ELM 高性能稳态运行, 并首次揭示了 Grassy ELM 形成的物理机制 [1], 发现较低的边界密度梯度和较宽的边界台基是其形成的关键因素, 并进而系统验证了其辐射偏滤器、高密度、高自举电流份额、完全非感应电流驱动等未来稳态聚变堆特需运行条件的兼容性。进一步, EAST 发展了一种结合靶板探针和偏滤器辐射信号的辐射偏滤器反馈控制新方法, 在维持等离子体高约束性能的前提下, 实现了靶板电子温度 T_{et} 稳定控制在 5-8eV, 如图 1 所示。在此基础上, 将 Grassy ELM 高性能稳态运行模式与辐射偏滤器反馈控制相结合, EAST 发展出了一种高性能稳态等离子体运行模式。这一运行模式为解决聚变堆热负荷问题, 实现聚变堆的高性能稳态运行提供了一种潜在的新方案。其等离子体部分归一化参数与 CFETR 的设计参数接近, 有望在 CFETR 得到应用。

EAST 接下来的目标是在更高的注入功率下实现 400 秒高性能 H 模等离子体稳态运行。大 ELM 及热负荷问题成为阻碍这一科学目标实现的主要障碍。这一运行模式为 EAST 实现其科学目标提供了一种有效的解决方案。

关键词: EAST; CFETR; Grassy ELM; 辐射偏滤器反馈控制; H 模; 热负荷; 稳态运行

参考文献

[1] G. S. Xu *et al.*, Promising High-Confinement Regime for Steady-State Fusion, *PRL* 2019, 122, 255001.

基金项目: ITER 专项 (NO. 2015GB101002), 国家自然科学基金项目 (NO. 11575235), 中国科学院前沿科学重点研究项目 (NO. QYZDB-SSW-SLH001) 等

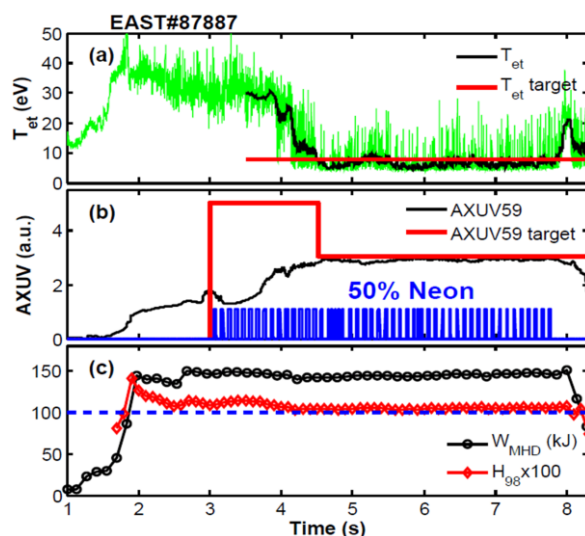


图 1 EAST 辐射偏滤器 50% 氖气脉冲注入反馈控制, (a) 靶板打击点附近电子温度 T_{et} 控制在 5-8eV, (b) 偏滤器辐射控制在设定值附近, (c) 没有储能下降。Grassy ELMs 较强的杂质排出能力至关重要。