

基于射频波和杂质主动注入的边缘局域模控制研究进展

钟武律¹、邹晓岚²、肖国梁¹、梁桢树^{1,2}、张轶泼¹、冯北滨¹、陈程远¹、白兴宇¹、宋绍栋¹、高金明¹、刘春华¹、杨曾辰¹、蒋敏¹、施培万¹、L. Delpech²、A. Ekedahl²、G. Giruzzi²、T. Hoang²、D. Mazon²、Y. Peysson²、董春风¹、孙平¹、刘亮¹、王正涵³、韩明昆³、肖维文⁴、刘阿娣⁵、严龙文¹、卢波¹、余德良¹、石中兵¹、刘仪¹、杨青巍¹、许敏¹、段旭如¹、刘永¹、HL-2A 团队¹

¹核工业西南物理研究院，成都，610041

²法国原子能委员会聚变研究所，卡达拉奇，F-13108

³大连理工大学物理学院，大连，116024

⁴浙江大学聚变理论与模拟中心，杭州，310027

⁵中国科学技术大学近代物理系，合肥，230026

Email: zhongwl@swip.ac.cn

摘要：在磁约束聚变装置典型的高约束模（H 模）等离子体放电条件下，阵发性的边缘局域模（ELM）爆发将向等离子体边界以外喷发大量粒子和能量，使得面向等离子体第一壁上的热沉积有可能超过材料的热负荷极限，为了避免大幅度的 ELM 对聚变装置造成损害，需要发展有效缓解和控制 ELM 的技术方法。中国环流器二号 A（HL-2A）托卡马克近期重点开展了基于射频波和杂质主动注入的 ELM 缓解研究：利用基于 PAM 天线的低杂波电流驱动（LHCD）实现了对 ELM 的缓解，研究表明 ELM 缓解与台基湍流增强密切相关¹，观察到 LHCD 引起的极向速度剪切降低改变了湍流径向波数谱并增强了湍流强度，实验和理论模拟结果一致地揭示了径向波数谱移动对湍流强度的调节作用²⁻³。此外，利用电子回旋共振加热（ECRH）开展了对 ELM 的控制研究，观察到 ELM 的行为与 ECRH 沉积位置和功率密切相关；在杂质主动注入缓解 ELM 研究方面，HL-2A 通过利用激光吹气系统注入不同类型的重杂质粒子实现了对 ELM 的缓解和抑制，实验表明缓解效果与注入杂质质量密切相关⁴；此外 HL-2A 上首次提出了利用掺杂的超声分子束（SMB）向 H 模等离子体中注入燃料（氘气）和杂质混合气体（如氖气、氩气等），并成功实现了对 ELM 的缓解⁵，实验表明 ELM 行为的改变与杂质气体比例密切相关，如 30% 的掺氖杂质 SMBI 能有效地缓解 ELM，使得靶板峰值热通量降低为缓解前的 10%，平均热通量降低为缓解前的 60%，并且无杂质聚芯，掺杂 SMBI 技术有可能实现既保持等离子体高约束状态又维持靶板低热通量。

关键词：托卡马克，高约束模，边缘局域模控制

参考文献

- [1] G.L. Xiao *et al.*, Effect of lower hybrid current drive on pedestal instabilities in the HL-2A tokamak, *Phys. Plasmas* 2017, **24**, 122507
- [2] G.L. Xiao *et al.*, Effect of the externally driven velocity shear on the turbulence radial wavenumber spectral shift and its amplitude, *Phys. Plasmas* 2019, **26**, 072303.
- [3] G.L. Xiao *et al.*, Turbulence regulation with radial wavenumber spectral shift caused by externally driven $e \times b$ velocity shear during edge-localized mode mitigation, *Nucl. Fusion* 2019, in press.
- [4] Y.P. Zhang *et al.*, Control of edge localized modes by pedestal deposited impurity in the HL-2A tokamak, *Nucl. Fusion* 2018, **58**, 046018
- [5] W.L. Zhong *et al.*, Impact of impurity mixture gas seeded by supersonic molecular beam injection on edge-localized modes in the HL-2A tokamak, *Nucl. Fusion* 2019, **59**, 076033

基金项目：国家重点研发计划磁约束核聚变能发展研究专项(NO. 2017YFE0301106)，国家自然科学基金项目(NO. 11775070)，四川省科技计划项目（2018JY0054）等。