

中国环流器二号 A 装置上利用 $n=1$ 共振扰动磁场对大幅度边缘局域模的抑制与缓解研究

刘仪¹、季小全¹、孙腾飞¹、刘钺强²、柯锐¹、周利娜³、钟武律¹、高金明¹、李旭¹、吴娜¹、刘亮¹、许宇鸿⁴、许敏¹、段旭如¹，刘永¹、HL-2A 团队

¹中核集团核工业西南物理研究院，成都 610225

²通用原子能，圣地亚哥，POBOX 85608

³大连理工大学物理学院，大连

⁴西南交通大学，成都

Email: yiliu@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）尤其是高参数下 I 型大幅度 ELM 的爆发将向等离子体边界喷发大量粒子和热流，使得聚变装置上偏滤器靶板上的热沉积超过金属材料的热负荷极限从而烧毁靶板。为了避免大幅度的 ELM 对聚变装置造成损害，目前各国正在探索发展有效缓解和控制 ELM 的技术。中国环流器二号 A（HL-2A）托卡马克装置上近期重点开展了利用外加磁扰动主动缓解 ELM 的研究，在利用两组内部共振磁扰动线圈产生的 $n=1$ 共振磁扰动（RMP）实现了对小 ELM 的缓解的基础上，又成功地实现了对 I 型大幅度 ELM 的抑制或缓解。研究表明 $n=1$ RMP 能够有效地降低 I 型 ELM 的幅度从而减弱偏滤器靶板上的热沉积，同时发现 I 型 ELM 在被 $n=1$ RMP 缓解时仍然维持 I 型 ELM 的特征频率和约束特征，即等离子体高约束品质仍然得到保持。进一步的研究发现在 I 型大幅度 ELM 受到缓解时，等离子体边界出现了一种特征频率约 2000 赫兹的相关扰动，它只起到了弛豫地排出粒子和热流的作用，更有效地保护了聚变装置第一壁材料，同时又为杂质和热流的持续排出提供了通道。湍流测量分析表明，该相关扰动是 RMP 引起的湍流增强及湍流间非线性耦合的自洽结果。结合 HL-2A 托卡马克装置的理论模拟计算表明两组内部共振磁扰动线圈产生的 $n=1$ 共振磁扰动在等离子体中能够引起等离子体边界发生剥离型位移响应，从而能够达到对 I 型大幅度 ELM 的完全抑制。实验和理论模拟结果的一致地揭示了 $n=1$ 共振磁扰动对 I 型大幅度 ELM 的控制作用机理。这一研究结果提出了一种 ELM 的简洁控制方法或途径，即在未来磁约束聚变堆中仅利用一对紧凑布置的内部共振磁扰动线圈就可能实现对 I 型大幅度 ELM 的完全抑制或有效缓解，这对内部空间极为有限的未来磁约束聚变堆的 ELM 的缓解和控制研究有重要意义。

关键词：托卡马克；高约束模；I 型边缘局域模抑制/缓解

参考文献

[1] Evans T.E. et al 2004 Phys. Rev. Lett. 92 235003

[2] Liu et al., Phys. Plasmas 24 056111 (2017)

基金项目：国家磁约束核聚变能发展研究专项(NO.2015GB10400)