

## HL-2A 装置 LHCD 等离子体高能电子动力学研究

张轶波<sup>1</sup>, D. Mazon<sup>2</sup>, 张洁<sup>1</sup>, Y. Peysson<sup>2</sup>, 周建<sup>1</sup>, 杨进蔚<sup>1</sup>, 李旭<sup>1</sup>, 宋先瑛<sup>1</sup>, 白兴宇<sup>1</sup>,  
石中兵<sup>1</sup>, 杨青巍<sup>1</sup>, 许敏<sup>1</sup>, HL-2A 团队<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中核集团核工业西南物理研究院, 成都 610225

<sup>2</sup>法国原子能委员会 (CEA) 聚变研究所 (IRFM), 13108, 法国

Email: [zhangyp@swip.ac.cn](mailto:zhangyp@swip.ac.cn)

**摘要:** 硬 X 射线相机是开展高能粒子物理研究的关键诊断系统<sup>1,2</sup>, 可以提供高能电子在等离子体内时空分布的演化信息。中国环流器二号 A (HL-2A) 3 托卡马克新发展了一套硬 X 射线相机系统, 该相机具有 21 测量通道, 探测能量范围 20-200 keV。该相机安装在 HL-2A 装置中平面窗口, 垂直观察等离子体, 等离子体覆盖范围  $\rho \leq 0.7$ , 空间分辨率可达 2 cm。硬 X 射线相机系统在 HL-2A 装置 2018 年度实验期间成功投入运行, 并在等离子体低杂波电流驱动 (LHCD) 期间取得丰富的实验结果<sup>4</sup>。低杂波电流驱动是目前为止驱动效率最高的非感应电流驱动方法, 是研究长脉冲稳态运行和先进托卡马克位形等物理问题不可或缺的重要手段。利用硬 X 射线相机我们对 LHCD 期间高能电子分布进行了测量研究, LHCD 期间高能电子主要在 40-60 keV 能量段产生, 并且具有非常明显的峰化分布, 这些测量结果表明 HL-2A 装置 LHCD 期间低杂波功率主要在等离子体芯部沉积。在短脉冲 LHCD 放电期间, 观察到逃逸电子产生被显著增强。硬 X 射线测量结果表明 LHCD 期间有大量的快电子产生, 快电子尾部至少达到了 200 keV。快电子能量已超过了临界逃逸能量, 从而高于临界逃逸能量的部分快电子将被等离子体环电场加速而成为逃逸电子, 从而诱发了逃逸增强。利用硬 X 射线相机在 HL-2A 装置深入开展低杂波电流驱动和高能电子实验研究将是我们的下一步的主要工作。

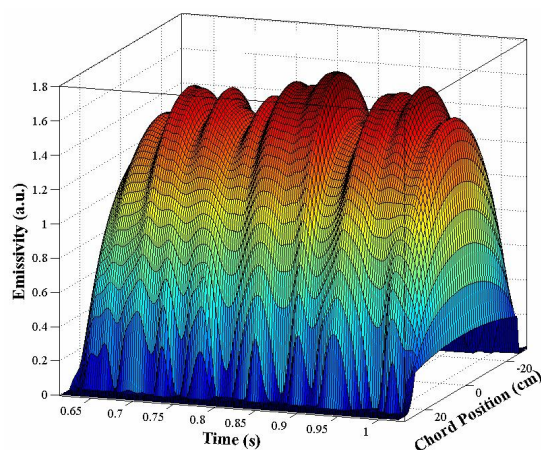


图 1 HL-2A 装置 LHCD 等离子体内高能电子剖面分布

**关键词:** 高能电子, 低杂波电流驱动, 硬 X 射线相机, 逃逸电子, 托卡马克

#### 参考文献

- [1] O. Barana, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 49, 947 (2007).
- [2] Y.P. Zhang, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 103501(2010).
- [3] M. Xu, et al., Nucl. Fusion 55, 104022 (2015).
- [4] Y.P. Zhang, et al., AIP Advances accepted (2019).

**项目支持:** 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (2015GB111002), 国家自然科学基金项目 (NO.11775068)。