

HL-1M 装置注入和加热实验的 流速与电场测量

洪文玉, 李 强, 王恩耀

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

MEASUREMENTS OF THE EDGE FLOW VELOCITY AND THE ELECTRICAL FIELD IN INJECTION AND HEATING ON HL-1M TOKAMAK

HONG Wen-yu, LI Qiang, WANG En-yao

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Experimental measurements of the edge plasma rotation and electric field have been carried out on both SOL and the boundary of the HL-1M plasmas for Ohmic, Neutral Beam Injection (NBI), Ion Cyclotron Resonance Heating (ICRH), Low Hybrid Wave (LHW) Injection and Electric Cyclotron Resonance Heating (ECRH) with a Mach/Langmuir probe array. The radial profiles of the poloidal flow rotation velocity V_{pol} , the radial electric field E_r and the poloidal electric field E_θ are measured during experiments of NBI, ICRH, LHW and ECRH, respectively. In experiments of HL-1M tokamak, NBI, ICRH, LHW, and ECRH were used to study the confinement improvement, the edge fluctuations and the radial transport.

Key words: poloidal flow velocity; radial electric field; poloidal electric field

摘 要: 利用马赫-郎缪尔探针组研究了 HL-1M 装置刮离层和边缘等离子体流在欧姆放电、中性束注入、低杂波注入、离子回旋加热和电子回旋加热等情况下的极向流速、径向电场和极向电场的变化与分布, 研究并讨论了它们对降低边缘粒子径向传输和改善等离子体约束性能的影响。

关键词: 极向流速; 径向电场; 极向电场

中图分类号: TL61+2.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-7086(2000)03-0148-04

1 引 言

在聚变装置中, 等离子体边界条件对整个等离子体约束性能的影响是非常敏感的。L-H 模转换机制与边界径向电场 E_r 、 E_θ 的梯度及极向旋转速度等密切相关^[1-2], 同时, 边缘等离子体的径向输运与边缘极向电场 E_θ 的变化有关^[3]。在 HL-1M 装置中, 利用中性束注入 (NBI)、低杂波 (LHW) 注入、离子回旋加热 (ICRH) 和电子回旋加热 (ECRH) 等实验; 观测边缘等离子体流速和电场的径向分布与变化来研究改善约束性能与 E_θ 、 E_r 、 dE_r/dr 及边界涨落的关系。

收稿日期: 2000-01-15

作者简介: 洪文玉 (1941-), 男, 福建省晋江市人, 西南物理研究院研究员级高级工程师, 从事核聚变装置真空测量和等离子体诊断的研究。

2 实 验

在进行 NBI、LHW、ICRH 和 ECRH 实验时, HL-1M 装置的工作参数为 $B = 2.0 \sim 2.6 \text{ T}$; 等离子体电流 $I_p = 120 \sim 200 \text{ kA}$; 等离子体线平均密度 $n_e(0) = 0.8 \sim 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$; 电子温度 $T_e(0) = 0.5 \sim 1.0 \text{ keV}$; 离子温度 $T_i(0) = 0.3 \sim 0.8 \text{ keV}$.

径向任意调节和极向可旋转 360° 的马赫-朗缪尔探针组用于测量 HL-1M 装置边缘等离子体环向流、极向流、径向电场和极向电场的径向分布。一组探针是由 5 根探针元件组成, 以测量边缘等离子体的电位、边缘区的环向流和极向旋转速度; 另外一组探针由 6 根探针元件组成, 可同时测量径向电场和极向电场^[4]。

3 实验结果

3.1 中性束注入和离子回旋加热

在 ASDEX 装置实验中, 中性束注入第一次观测到 H 模产生, 这就说明了中性束注入降低了边缘扰动、径向传输、壁和孔拦的粒子再循环以及增长能量的约束时间^[3]。

在 HL-1M 装置的中性束注入实验中, 中性束是以 $0.15 \sim 0.20 \text{ MW}$ 的功率注入; 离子回旋加热实验, 注入功率接近 100 kW 。实验中均观测到边缘等离子体极向旋转速度 V_{pol} 在电子反磁方向上增加, 径向电场 E_r 和极向电场 E_θ 反向增加, 如图 1 所示。

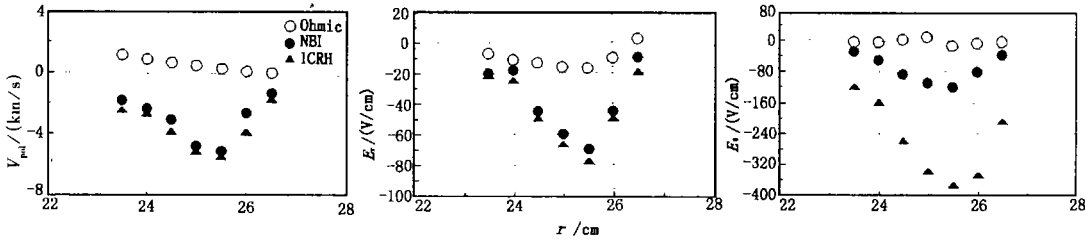


图 1 欧姆放电, NBI 和 ICRH 期间, V_{pol} 、 E_r 和 E_θ 的径向分布

边缘等离子体极向旋转速度 V_{pol} 与径向电场 E_r 和离子压力梯度 dp_i/dr 之间的关系如下^[4]

$$V_{\text{pol}} = \frac{E_r}{B} - \frac{1}{eZ_i n_i B} \frac{dp_i}{dr} + \frac{B_{\text{pol}}}{B} V_t \quad (1)$$

式中 B_{pol} 为环向磁场的极向分量; V_t 为等离子体的环向流速; $p_i = n_i T_i$; T_i 为离子温度。从图 1 可以看出, 在 NBI 期间产生的最大径向电场 $E_r = -7.0 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ($B = 2.0 \text{ T}$), 最大极向旋转速度 $V_{\text{pol}} = -5.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 在 ICRH 期间产生的最大径向电场 $E_r = -7.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ($B = 2.2 \text{ T}$), 最大极向旋转速度 $V_{\text{pol}} = -5.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此说明, 在 HL-1M 装置的 NBI 和 ICRH 实验中, 产生等离子体极向旋转的主要原因是由 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移和离子压力梯度 dp_i/dr 引起的, 从而减小了径向传输和改善等离子体的约束性能。边缘粒子传输的减小可通过瞬时粒子通量来描述^[3]

$$\Gamma(t) = n_e(t) \frac{\mathbf{E}(t) \times \mathbf{B}}{B^2} \quad (2)$$

式中 $n_e(t)$ 为等离子体密度; $\mathbf{E}(t)$ 为电场矢量; $\mathbf{B}$ 为磁场矢量。这个通量在径向方向上的分量

$$\Gamma(t) = n_e(t) \frac{E_\theta B_\varphi}{B^2} \quad (3)$$

式中 B_φ 为磁场的环向分量, 因此 $B_\varphi \approx B$ 。式(3)可近似写成

$$\Gamma(t) \approx n_e(t) \frac{E_\theta(t)}{B} \quad (4)$$

式中 B 是已知的, $E_\theta(t)$ 和 $n_e(t)$ 可以通过测量获得。由图 1 可以给出, 在 NBI 期间产生的最大极向电场 $E_\theta = -12.0 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$; 在 ICRH 期间产生的最大极向电场 $E_\theta = -35.0 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。等离子体密度 $n_e(t)$ 约为 $0.9 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ (NBI) 和 $0.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ (ICRH)。根据式(4), 可粗略得出径向传输通量的最大值近似为 $-5.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (NBI) 和 $-9.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (ICRH), 这说明在 NBI 和 ICRH 实验中, 边缘粒子径向传输通量可分别降低 $5.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 LHW 注入和电子回旋加热

在 HL-1M 装置欧姆放电期间, 加入 LHW 后, 刮离层和边缘的等离子体流速及扰动特性有显著变化, Ma 值下降, 极向速度 V_{pol} 在离子反磁方向上增加^[5]。当纵场 B 方向反向改变时, 边缘等离子体极向流的方向也改变, 即在电子反磁方向上增加, 边缘径向电场 E_r 和极向电场 E_θ 也有较大的反向变化, 如图 2 所示。在电子回旋加热期间, 平行流马赫数 Ma 增加^[6], 并观测到边缘等离子体极向旋转速度 V_{pol} 在离子反磁方向上增加, 径向电场 E_r 和极向电场 E_θ 也有较大增加。

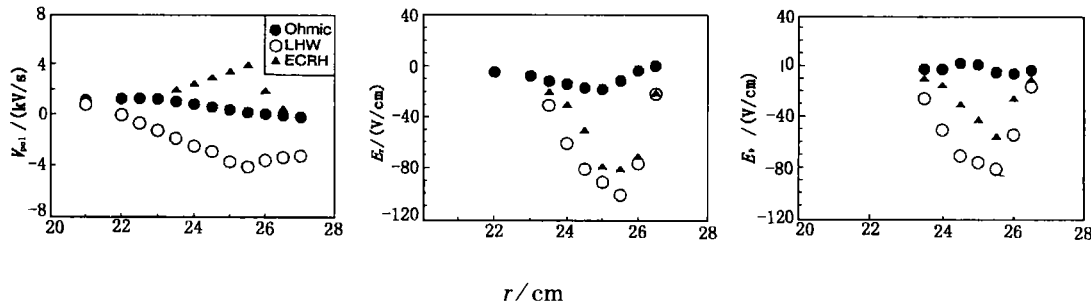


图 2 欧姆放电, LHW 和 ECRH 期间, V_{pol} 、 E_r 和 E_θ 的径向分布

从图 2 可以看出, 在 LHW 实验期间产生的最大径向电场 $E_r = -9.6 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ($B = 2.6 \text{ T}$), 最大极向旋转速度 $V_{\text{pol}} = -4.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 在 ECRH 实验期间所产生的最大径向电场 $E_r = -8.2 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ($B = 2.6 \text{ T}$), 最大极向旋转速度 $V_{\text{pol}} = 4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此说明, 在 HL-1M 装置的 LHW 和 ECRH 实验中, 产生等离子体极向旋转的主要原因也是 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移引起的, 从而减小了粒子的径向输运和改善等离子体约束性能。从图 2 也可以看出, 在 LHW 实验期间产生的最大极向电场 $E_\theta = -8.0 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而等离子体密度 $n_e(t)$ 约为 $2.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。根据式(4), 可粗略得出径向传输通量最大值近似为 $-6 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此在 LHW 实验中, 边缘粒子径向传输通量可降低 $6 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 ECRH 实验期间产生的最大极向电场 $E_\theta = -5.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 它也明显降低了边缘粒子的径向传输及改善等离子体的约束性能。

4 结 论

HL-1M 装置在不同运行状态下进行了刮离层和边缘等离子体极向流速、径向电场和极向电场径向分布的实验测量,实验指出,中性束注入、离子回旋加热、低杂波注入和电子回旋加热实验改善了边缘等离子体的扰动特性和约束性能。

参考文献:

- [1] DONG J Q, HORTON W. Momentum-energy transport from turbulence driven by parallel flow shear[J]. *Phys Plasmas*, 1994, 1(10): 3250.
- [2] XIAO C, JAIN K K, ZHANG W, *et al.* Measurement of plasma rotation velocitys with electrode biasing in the STOR-M tokamak[J]. *Phys Plasmas*, 1994, 1(7): 2291.
- [3] WANG E Y, WANG XIN, DIEBOLD D A, *et al.* Biased H mode experiments in PHAEDRUS-T[J]. *Nuclear Fusion*, 1995, 35(4): 467.
- [4] 洪文玉, 王恩耀, 潘宇东, 等. 弹丸和超声束注入对 HL-1M 装置边缘电场和等离子体旋转的影响[J]. *真空与低温*, 1998, 4(3): 136 ~ 139.
- [5] HONG W Y, WANG E Y, RAN L B, *et al.* The flucruations and flow velocities measured with a Mach probe array on the HL-1M tokamak[J]. *J Nuc Mater*, 1997, 241-243: 1234.
- [6] 洪文玉, 王恩耀, 潘宇东, 等. HL-1M 装置边缘扰动和流速的实验研究[J]. *真空科学与技术*, 1998, 18(3): 176 ~ 186.

(上接第 137 页)

- [3] HOLLAND L. Vacuum deposition of thin films[M]. Chapman and Hall Ltd., London, 1966.
- [4] GRUBB A D. The LOF semi-continuous thermal evaporation plant [C]. Thompson Publications, 1969, 6: 42 ~ 46.
- [5] CHAPIN J S. Sputtering source and apparatus[P]. U S Patent: 4166018, 1979.
- [6] YOUNG P, BERNARDI R. Autosolar paper [C]. SAE Technical Paper Series, 1988: 880050.
- [7] MCKELVEY H E. Magnetron cathode sputtering apparatus[P]. U S Patent: 4356073 1982, 4422916 1983.
- [8] 李明顺. 玻璃幕墙技术规范[M]. 北京:中国建材工业出版社, 1988: 3 ~ 5.
- [9] 邓雅颖. 中空玻璃的发展前景[J]. *玻璃*, 1999(1): 9.
- [10] TIMOTHY E JOHNSON. Low-e glazing design guide[M]. Butterworth Architecture, Boston, 1991: 12.
- [11] 彭传才. 柔性基材高透明低方阻卷绕镀膜技术[C]. 上海: TFC99' 全国薄膜学术讨论会会议论文集, 1999: 227.
- [12] 徐美君. 低辐射玻璃生产应用及市场浅析[J]. *建筑玻璃与工业玻璃*, 1999(3): 24 ~ 26.
- [13] 戴法震. 我国建筑镀膜玻璃生产现状与发展中几个技术问题的探讨[J]. *建筑玻璃与工业玻璃*, 1998(5): 12 ~ 16.
- [14] 李旭春. 孪生靶溅射镀膜用高频 PWM 电源[C]. TFC99' 全国薄膜学术讨论会会议论文集, 1999: 267 ~ 270.