

KT-5C 托卡马克上不同限制器偏压下 等离子体 p 约束改善的实验研究*

高辉 翟侃 闻一之¹⁾ 万树德 王贵鼎 俞昌旋

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230027)

(1994年4月14日收到)

在 KT-5C 托卡马克上,采用多块组合的可偏压限制器控制等离子体边缘电场,进行了改善等离子体的边缘参数及其机制的研究。实验显示,限制器的正、负偏压都能改变等离子体电位,但正偏压更有效,能有效地建立边缘电场,进而抑制边缘扰动改善等离子体约束。利用可移动静电探针,测得正偏压期间边缘电子温度 $T_e(r)$ 、电子密度 $n_e(r)$ 、空间电位 $V_p(r)$ 分布变陡,与计算得到的边缘粒子通量 $\Gamma(a_0)$ 减少,整体粒子约束时间 τ_p 增加结果是一致的。

PACC: 5255; 5225; 5235R

1 引言

实验^[1,2]和理论^[3,4]研究表明,等离子体边缘电场对其约束性能起重要的作用。文献[5—8]利用偏压限制器和电子束注入方法主动控制边缘电场都明显地观察到约束改善。Taylor 等人采用径向电流注入的方法触发等离子体边缘径向电场的突变,此时可见到 L 模向 H 模转换的一系列特征现象,如边缘 $H\alpha$ 线强度减少,线平均密度 n_e 增大,在等离子体最后一个闭合磁面附近,温度和密度分布变陡,形成一个输运势垒,使粒子的横向输运降低^[9,10],从而使约束性能改善。

自1992年起,我们着手在小型托卡马克 KT-5C 上进行用偏压限制器的方法主动控制边缘电场,抑制边缘扰动及改善等离子体约束的实验研究。我们使用可移动静电探针测量边缘区域电子温度、密度、空间电位的径向剖面,用 Staib 扰动模理论^[11]计算偏压前后限制器附近粒子的横向扩散参数(横向扩散系数 $D_1(a_0)$ 、通量 $\Gamma_1(a_0)$ 、整体粒子约束时间 τ_p),并进行了比较。

2 实验安排

图1(a)为 KT-5C 装置及诊断系统分布顶视图,根据其特点设计的偏压限制器(图1(b))分成沿纵向平行的两层,每层四块,共八块,各块间相互绝缘并与真空室绝缘,因而

* 国家自然科学基金、中国科学院和国家高技术计划经费资助的课题。

1) 通讯联系人。

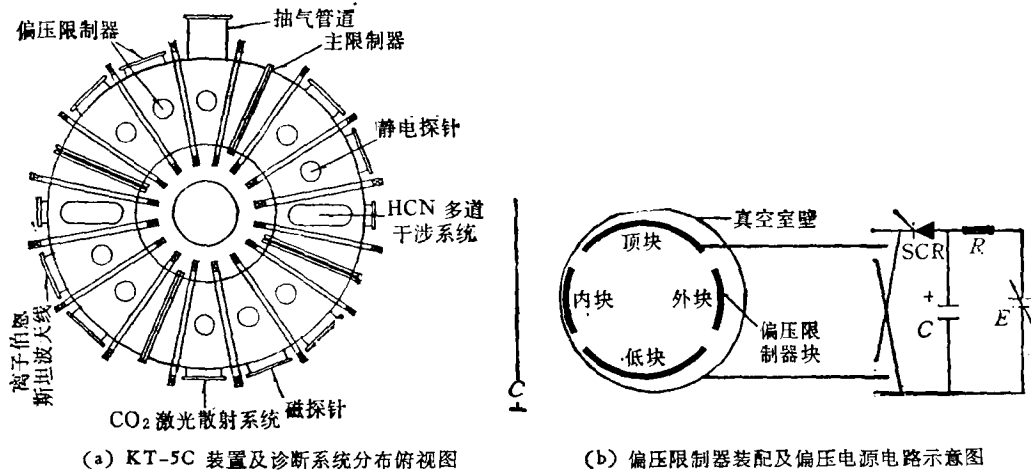


图 1

可以自由组合,形成不同大小、不同位置(在等离子体中)的收集面积(垂直 B_z)。偏压限制器在真空室中向里偏心 1cm,材料为不锈钢,每块内径为 8.5cm,宽为 2cm。考虑到供电与分析的方便,初步实验是将全部限制器块连接到同一偏压电源上进行的,该电源是总容量为 22mF 的电解电容器组,偏压可在托卡马克放电过程中任意时刻加上,电容电压在放电过程中保持不变。偏压范围为 $-100\text{V} \leq V_{\text{lim}} \leq 200\text{V}$ 。目前 KT-5C 托卡马克的运行参数为:大半径为 31.5cm,主限制器小半径为 9.5cm,纵场强度为 2kG,等离子体电流为 6kA。

3 实验结果与讨论

图 2 至图 4 分别给出等离子体空间电位、温度、密度在偏压前后的径向剖面。在正偏

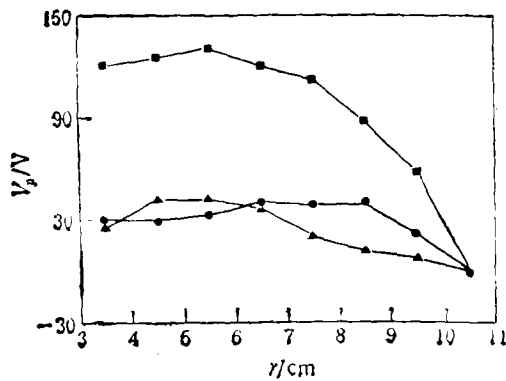


图 2 空间电位 $V_p(r)$ 的径向剖面比较 ● 为限制器悬浮; ■ 为偏压: +80V; ▲ 为偏压: -80V

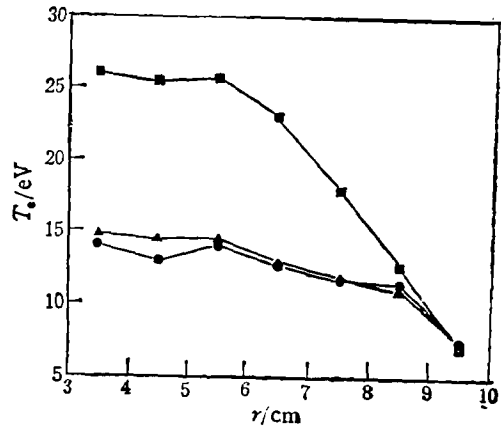


图 3 电子温度 $T_e(r)$ 的径向剖面比较
符号说明同图 2

压情况下, 边缘径向电场 E_r 变化很大, 由常态下的 $+18\text{V/cm}$ 变为 $+45\text{V/cm}$, 增加 2.5 倍 ($r \approx 8.5\text{cm}$ 处)。相应地边缘密度、温度分布变陡, 并略有下降。在 $r = 9.5\text{cm}$ 处, 密度和温度分别减少 1.4 倍和 1.1 倍。 $n_e(r)e$ 倍折合长度 λ_n 由常态的 5mm 降低到 2.5mm 。

正偏压有效地提高了等离子体电位 V_p , 但限制器与等离子体之间的电位差并不大, 这使得等离子体与限制器之间的相互作用减少, 这是十分有利的。但等离子体电位若过高会使得其与真空壁之间电位差很大, 导致放电猝灭的可能性增大。然而由于正偏压改善了边缘电场, 边缘的随机涨落受到抑制, 增加了等离子体与壁之间的阻抗, 从而使这种“猝灭”受到抑制。

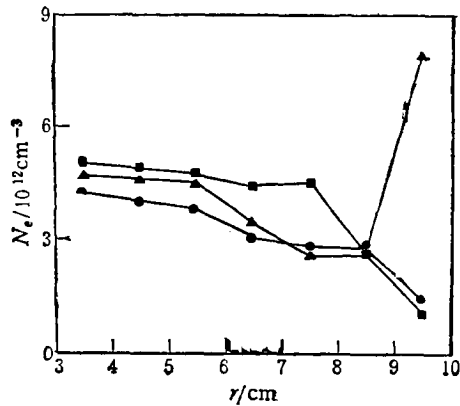


图 4 电子密度 $n_e(r)$ 的径向剖面比较
符号说明同图 2

表 1

	$D_{\perp}(a_0)/10^4\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\Gamma_{\perp}(a_0)/10^{16}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	τ_p/ms
常态放电:	4.10	5.49	0.26
$V_{\text{bias}} = +80\text{V}$	2.33	3.70	0.52

观察负偏压情况, 等离子体空间电位没有变为负值, 这样等离子体与限制器之间的电位差很大, 导致它们之间的强烈相互作用, 限制器收集电流陡增, 这也是负偏压不能过高的主要原因。负偏压下电子密度的增加 (参见图 4), 可能来自杂质的再循环增加, 或杂质的累积增加。

使用偏压限制器是为了建立极化的刮削层, 使放电的约束性能得到改善。本实验表明正偏压时边缘的静电扰动、磁扰动受到强烈抑制, 负偏压不明显。TEXT^[12]

和 HL-1^[13] 上的工作已证明, 边缘粒子横向扩散的主要机制是扰动涨落。为了比较常态放电和正偏压放电中的粒子扩散特征, 我们采用 Staib 扰动扩散模理论^[14]用静电探针测量的数据计算表征边缘粒子横向运输的几个特征量: 横向扩散系数 $D_{\perp}(a_0)$ 、通量 $\Gamma_{\perp}(a_0)$ 、整体粒子约束时间 τ_p 。其中由探针测量求得常态放电时, $\bar{n}_e$ 为 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$, 正偏压放电时, $\bar{n}_e$ 为 $4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ (参见图 4)。计算结果如表 1。

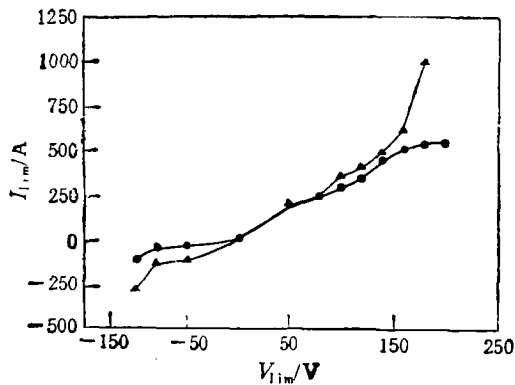


图 5 限制器收集面积 $S = 0.4$ (●) 和 $S = 2$ (▲) 时的限制器偏压 V_{lim} 与其收集电流 I_{lim} 关系曲线

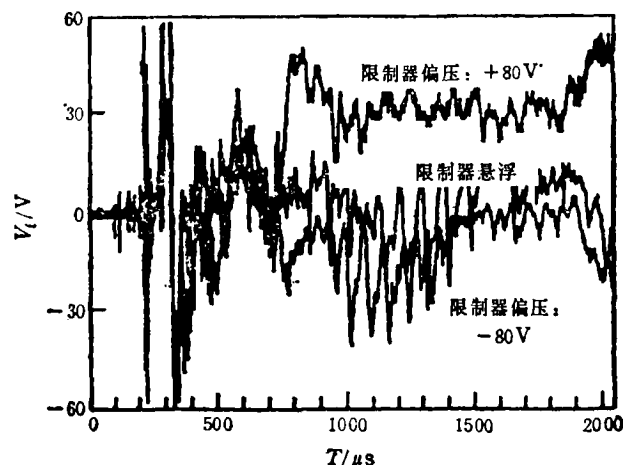


图6 探针位于 $r = 5.5\text{cm}$ 处测量的不同偏压下的悬浮电位 V_f 波形

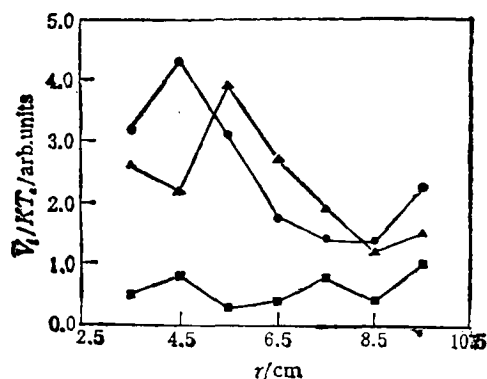
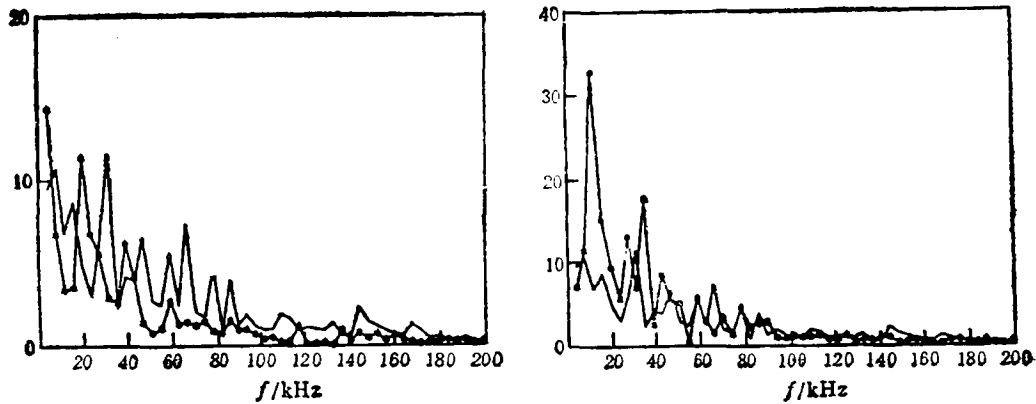


图7 不同偏压下的悬浮电位涨落方均根值的径向剖面 符号说明同图2

正偏压时 τ_p 增大2倍, $D_\perp$ 和 $\Gamma_\perp$ 分别下降到常态放电的67%和56%。Li等人¹⁾也给出正偏压时 $\Gamma_\perp$ 减少60%, τ_p 增加(20—50)%,这与本实验效果相似。另外由Staib理论^[11]计算的本实验粒子通量比文献[6]和[7]中提到通量要大一个数量级,实际观测本实验的限制器收集电流比文献[6]和[7]中提到的收集电流(几十安培)也平均要大一个数量级(参见图5)。

我们用静电探针和角向的磁探针获得了不同偏压下的边缘电磁扰动信号并对其涨落谱进行了分析。图6为探针在 $r = 5.5\text{cm}$ 处测量的悬浮电位,正偏压下 V_f 上的电位涨落被强烈抑制。在不同的偏压下, $\tilde{V}_f$ 涨落幅度均方根值的径向剖面如图7所示。正偏压情况下,等离子体边缘到内部电位扰动受到强烈的抑制。对密度扰动作频谱分析分别得到在正、负偏压下的频谱如图8。图9为密度扰动的均方根值在不同偏压下的径向剖

1) G. D. Li 等,核工业部环流器实验室成果报告会论文集(1990—1991)。



(a) * 为偏压: +100V

(b) * 为偏压: -80V

图8 探针位于 $r = 7.5\text{cm}$ 处测量的不同偏压下的密度扰动频谱——为限制器悬浮

面,可见在正偏压条件下,边缘密度扰动同样受到强烈抑制。磁扰动的频谱见图10,正偏压对磁扰动的抑制非常明显。负偏压不如正偏压。综上所述,正偏压下边缘各种扰动受到强烈抑制,从而导致约束的改善。

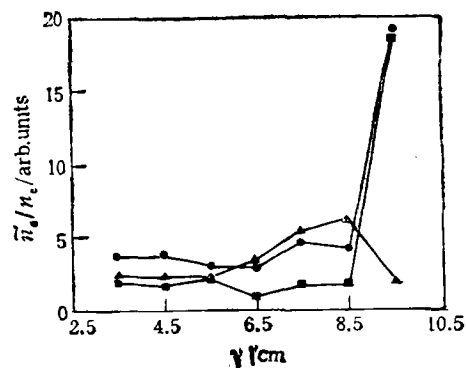


图9 不同偏压下的密度扰动均方根值的径向剖面比较 ■ 为偏压: +100V; 其余符号说明同图2

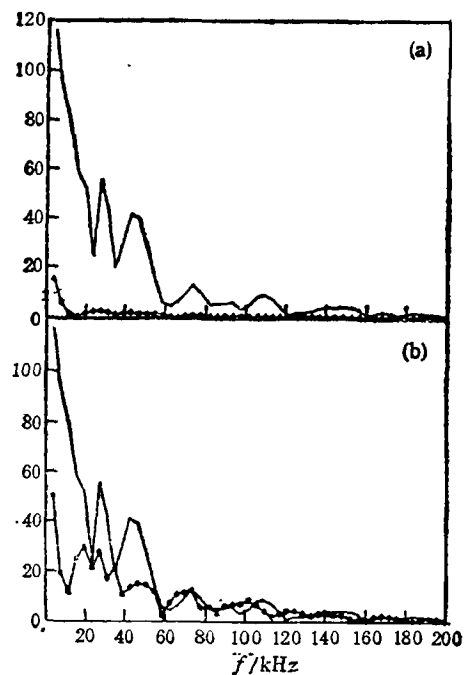


图10 由 $r = 9.5\text{cm}$ 处磁探针获得的不同偏压下磁扰动频谱 图例及符号说明同图8

以前的实验^[6-8]负偏压均在200V以上,才能明显地抑制边缘扰动,较低的负偏压影响是不大的。由于KT-5C装置结构尺度的限制,负偏压难以超过100V,低的负偏压不足以在边缘形成负径向电场(参见图2),从而在边缘形成一个有效的“输运垒”,因此未见抑制扰动的效果。

4 有关边缘电场与改善约束的分析

正、负偏压下, KT-5C 装置等离子体边缘扰动的差别是与偏压期间等离子体电位或径向电场的剖面不同相联系, 在正偏压下边缘扰动随着增大的径向电场受到抑制, 而负偏压时径向电场减少到接近于零, 使得扰动幅度不变或略有增加. 负偏压期间 SOL 层附近 E_r 明显减小而正偏压期间芯区和 SOL 层附近 E_r 显著增大, 这说明边缘电场的分布和扰动的幅度密切相关. 正偏压时边缘密度分布变陡是由边缘扰动受到抑制从而使粒子约束得到改善引起的. 在正偏压后, 等离子体电位得到很大提高, 边缘电场由原来的 $+18\text{V/cm}$ 变为 $+45\text{V/cm}$. 带电粒子的导向中心垂直于环向场 B_t 的横向电漂移增大, 整体的极向旋转增大, 从实验获得的 E_r , 我们计算得到极向旋转速度增大约 2 倍, 有效地提高了粒子的约束性能. 另外, 突然给限制器加上正偏压, 相当于引入一个随时间变化的电场 $E(t)$, 考虑等离子体在电场里的极化效应, 可引入附加的内部电场 $E_p^{[14]}$

$$E_p = E(t)/(1 + 4\pi m_i n_i c^2/B_t^2) = E(t)/\epsilon(n).$$

这是时间的函数, 引起导向中心的惯性漂移, 电子和离子的惯性漂移相反, 离子的惯性漂移速率远比电子的大, 所以在等离子体里将引起一个电流 $j, J \times B_t$ 克服极向阻尼, 有利于约束. Taylor^[1] 和 Uesugi^[6] 用注入径向电流的实验证实了这一结论.

5 结 语

KT-5C 托卡马克有关偏压限制器的初步实验表明: 在正偏压情况下边缘区域的电子密度和电子温度剖面变陡, 边缘 n_e, T_e 下降. 等离子体电位虽然没有出现 L—H 转换时的极大值点, 但电位骤升, 边缘径向电场增大 2.5 倍左右. 这些特征意味着在边缘区形成了一个“输运垒”, 有效地阻止了粒子的扩散, 并有利于边缘扰动涨落的抑制. 实验观测到的各种涨落信号变化及利用 Staib 扰动模理论计算的边缘横向扩散参数结果在数量级上相一致. 另一方面, 由于本实验条件所限, 难以施加足够高的负偏压, 故未观察到其明显作用.

- [1] R. J. Taylor *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989), 2365.
- [2] R. R. Weynants *et al.*, *Nucl. Fusion*, **30**(1990), 945.
- [3] K. C. Shaing *et al.*, *Phys. Fluids*, **B2**(1990), 1492.
- [4] S. I. Itoh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2276.
- [5] F. Wagner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 1406.
- [6] Y. Uesugi, Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Arlington Virginia, USA 27—28 September (1990).
- [7] S. Takamura *et al.*, *IEEE Trans. on Plasma Science*, **19**(5) (Oct. 1991), 885.
- [8] P. E. Phillips *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **145—147** (1987), 807.
- [9] G. R. Tyna *et al.*, 18th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Vol. 15C, Part 111(1991), III-89.
- [10] J. A. Tagle *et al.*, 18th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Vol. 15C, Part 111(1991), III-93.
- [11] P. Staib, *J. Nucl. Mater.*, **111/112**(1982), 109.

- [12] W. Rowan *et al.*, *Nucl. Fusion*, **27**(1987), 1105.
[13] S. K. Yang, *J. Nucl. Mater.*, **176/177**(1990), 699.
[14] B. E. 戈兰特著, 马腾才、秦运文译, 等离子体物理基础(原子能出版社, 北京, 1983), 第 332 页.

IMPROVING PLASMA CONFINEMENT BY LIMITERS BIASING ON KT-5C TOKAMAK

GAO HUI ZHAI KAN WEN YI-ZHI WAN SHU-DE

WANG GUI-DING YU CHANG-XUAN

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Received 14 April 1994)

ABSTRACT

The experiment on improving the plasma edge parameters and the studying of its mechanism had been carried out on KT-5C Tokamak, in which a set of biasing limiters that can be multiplely combined are used to control the edge plasma radial electric field. The result of the experiment shows that both the positive and the negative biasing can change the plasma potential, but the positive biasing is more effective to establish a steep radial electric field to control the edge fluctuation and thus improve the confinement of the plasma. The profile of the measured edge electron temperature, electron density and the space potential by a moveable Langmuir probe became more slanted during the period of positive biasing and this correspond to the calculation results of the decrement of the edge particles flux and the increment of the particle confine time.

PACC: 5255; 5225; 5235R