

中性束注入 RF 负离子源的发展及其特性研究

管 亮

(南华大学 数理学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:相对于灯丝源,RF 源由于不需要维护现在已经成为灯丝源的一个令人感兴趣的替代品,IPP 伽兴研究所对 RF 负离子源的大量的研究工作直接导致了 ITER 选择 RF 负离子源作为 ITER 堆中性束注入系统的离子源.这项工作使用三个实验装置:BATMAN、MANITU 及 RADI,这三个实验装置沿三条线平行的进行不同的研究.实验结果表明 IPP 的 RF 负离子源已经达到甚至超过了 ITER 的要求.

关键词:ITER;RF 负离子源;中性束注入

中图分类号:O532.26 **文献标识码:**A

Research on the Character and Development of the Neutral Beam Injector RF Negative Ion Source

GUAN Liang

(School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The RF source is now an interesting alternative to the reference design with filamentary sources due to its maintenance-free operation. Extensive R&D work on RF-driven negative hydrogen ion sources carried out at IPP Garching led to the decision of ITER to select this type of source as the new reference source for the ITER NBI system. The work is progressing with three test beds: BATMAN, MANITU and RADI, which are being used to carry out different investigations in parallel. The experimental results show that the RF source equals or surpasses the ITER requirements.

key words: ITER; RF negative ion source; neutral beam injector

为了达到核聚变要求的温度保证托卡马克聚变堆等离子体的稳态运行,必须对等离子体进行辅助加热.辅助加热的作用是将欧姆加热所能得到的较低等离子体温度提高到由等离子体聚变反应产物 α 离子慢化引起的加热所能达到的更高

温度.从目前的研究来看,辅助加热的方法主要有中性束注入(NBI)和射频(RF)波加热,其中中性束注入加热可能成为聚变实验装置和未来的聚变装置中主要的加热方法.中性束注入首先由离子源产生源等离子体,再引出、加速、聚焦形成等离

子束,然后通过中性化器形成中性束注入聚变等离子体.由此可见,离子源是中性束注入的一个核心部件^[1].

离子源由引出的离子种类可以分为正离子源和负离子源.正离子源研究起步较早,技术已基本成熟,但是正离子束的中性化效率会随着束能量的增加而降低($D^+ 200\text{ keV}$ 时仅为20%),而负离子束在 高能时仍有较高的中性化率(60%),所以发展负离子源技术是可控核聚变尤其是高能聚变的一个必然趋势.

1 实验装置及实验结果分析

2002 年 IPP (Max-Planck-Institut für Plasma-physik) 伽兴研究所为了替代 ITER 的弧驱动负离子源开始研究 RF 负离子源的研究.与弧驱动负离子源相比 RF 负离子源结构更加简单,只需要源体、RF 线圈和耦合电路,同时由于没有使用灯丝,所以不会像弧驱动负离子源那样受到灯丝寿命的影响,另外弧驱动负离子源灯丝会挥发从而覆盖铯层影响铯的馈入,而铯的馈入可以增加源的性能,所以 RF 负离子源将替代弧驱动负离子源.

ITER(国际热核实验堆)装置已经进入实际工程设计阶段,经过多次修改后确定使用 RF 负离子源作为标准源,其主要参数:装置两条注入束线,每条束线都安装一个离子束能量 1 MeV , 40 A D^+ 束的离子源,总功率 33 MW ,脉冲长度 $3\text{ }600\text{ s}$,源引出面积 $1.5\text{ m}\times0.6\text{ m}$,源气压 $\leq0.3\text{ Pa}$,离子流密度 $j_{D^+}=200\text{ A/m}^2$, $j_{e^-}/j_{D^+}<1$, j_{e^-} 为引出负离子时伴随的电子流密度^[2].

为了研究用于 ITER 的 RF 负离子源,IPP 利用三个实验装置进行了不同的研究:

1)BATMAN 装置束引出面积 $<0.01\text{ m}^2$ 主要用于低压条件时优化 j_{D^+} 、 j_{e^-}/j_{D^+} 及短脉冲($<6\text{ s}$)的研究.

2)MANITU 装置束引出面积 0.03 m^2 用来研究长脉冲($3\text{ }600\text{ s}$).

3)RADI 装置的引出源宽度与 ITER 一致,高度为 ITER 的一半,即半尺寸源,主要用于研究 RF 匹配电路,等离子体均匀性.

从表 1^[3]可见,在短脉冲时有部分指标已经达到或超过要求的参数,但是长脉冲还是存在一定差距.

表 1 ITER 中性束注入系统参数要求以及在 BATMAN 和 MANITU 上取得的结果

Table 1 Requirements of ITER neutral beam system and achievements of the test facilities BATMAN and MANITU

参 数		ITER 设计参数	BATMAN 得到参数	MANITU 得到参数
引出面积/ m^2		0.2	7.0×10^{-3}	1.88×10^{-2}
量热器	$D^+/(A\cdot\text{m}^{-2})$	200	230	120
离子流密度	$H^+/(A\cdot\text{m}^{-2})$	280	330	150
引出电压/kV		9	9	8 (H) 7 (D)
源气压/Pa		0.3	0.3	$0.3-0.4$
电子流密度与 离子流密度比(j_{e^-}/j_{H^+})		1	<1	<1 (H) $1.5-2$ (D)
脉冲长度/s		3600	<4	<600 (H) <200 (D)
源引出尺寸/ m^2		1.5×0.6	0.32×0.59	0.32×0.59
均匀度		$\pm10\%$		

2 RF 负离子源结构及特性

IPP RF 负离子源结构如图 1^[2]所示. RF 负离子源主要由三个部分组成:激励区、扩充区、引出区.圆柱形的激励区用来耦合 RF 功率($f_{\text{RF}}=1\text{ MHz}$)产生源等离子体,内侧有水冷法拉第屏蔽用来保护 Al_2O_3 陶瓷壁.源等离子体通过扩散进

入扩充区. RF 负离子源 H^+ 损失主要有三个过程:

- H^+ 与电子碰撞解吸: $e+H^+\rightarrow2e+H$;
- H^+ 与 H^+ 相互中和: $H^++H^+\rightarrow H+H$;
- H^+ 与 H 原子碰撞解吸: $H+H^+\rightarrow e+H_2$.
- H^+ 与电子碰撞解吸在电子能量大于 3 eV 时会有很大的反应截面,所以在扩充区与引出区之

间设置了过滤场用来降低电子温度 ($< 2\text{ eV}$) 阻止热电子进入引出区^[3],从而降低 H^- 损失.

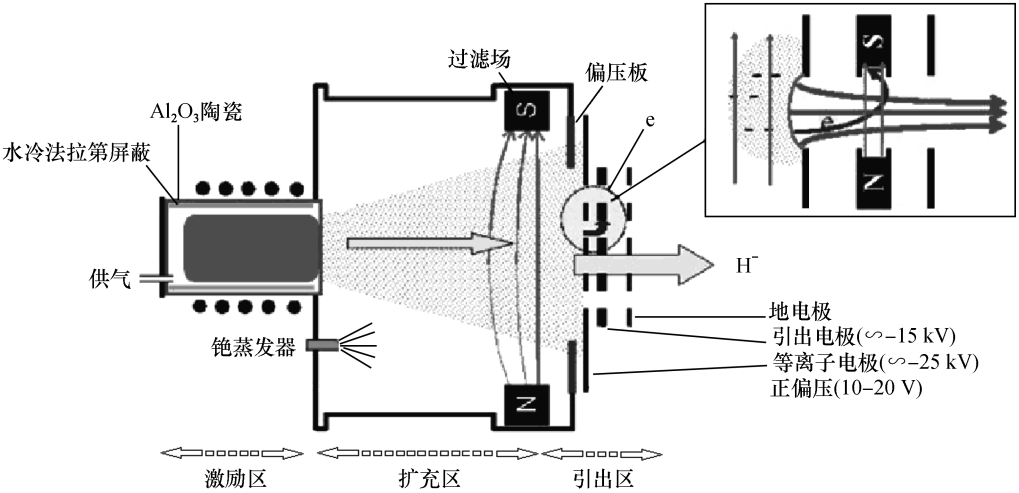


图 1 IPP RF 负离子源原理图

Fig.1 Schematic view of the IPP RF source

引出区由等离子体电极、引出电极、地电极三电极系统组成. 引出电极内有永磁体用来偏转掉伴随产生的电子. 由于负离子的存在时间很短, 所以只有在等离子体电极表面产生的负离子才可能被引出. 等离子体电极相对于源体加有 $10 \sim 20\text{ V}$ 的正偏压以减少伴随电子. 偏转电路如图 2^[4] 所示, 电流方向由一个二极管保证. 由图 3 可知, RF 源功率 85 kW , 源气压 0.4 Pa . 当偏转电压超过某个值时, 随着偏转电压的线性增加偏转电流也相应的增加. 但是在偏转装置电压较小时, 偏转电压保持不变, 电流为零. 在 OP 点离子电流任然保持在很高的值, 但是电子电流已经开始下降. 使用电流控制代替电压控制可以使等离子体电极电子和离子更加稳定, 由此保证源参数的稳定性.

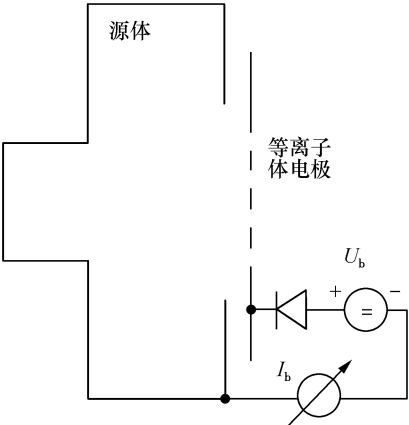


图 2 IPP RF 源偏压电路

Fig.2 Bias circuit of the IPP RF source

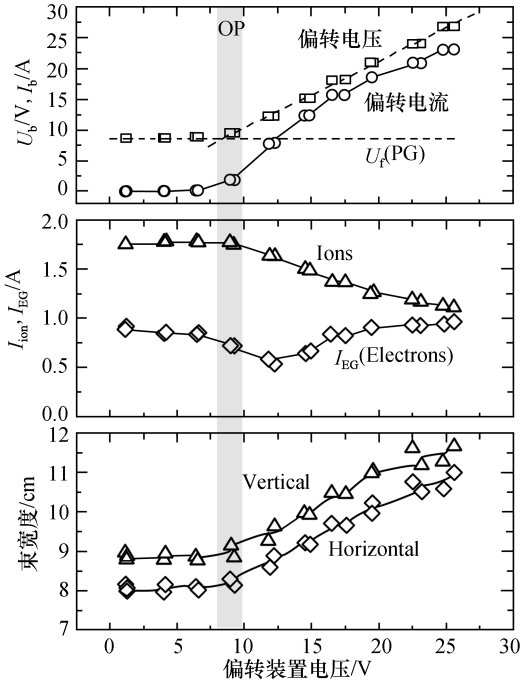


图 3 偏转电压 (U_b)、偏转电流 (I_b)、等离子体电流 (I_{ion}) 及电子电流 (I_{EG}) 随偏转装置电压的变化趋势

Fig.3 Dependence of the bias voltage (U_b), bias current (I_b), ion (I_{ion}) and electron current (I_{EG}) on the set bias voltage

铯蒸发器将小量铯 ($\sim 10\text{ mg/h}$) 馈入源. 铯的馈入可以降低伴随电子电流, 提高引出负离子流, 降低源的工作气压. 图 4^[5] 是馈入铯与未馈入

铯的对比. 由图可知, 馈入铯后 H^- 离子电流密度比未馈入铯的情况下要高 50 A/m^2 , 未馈入铯时电子离子比超过了 10, 而且馈入铯后离子电流密度几乎不受源气压的影响. 铯的作用是通过在等离子体电极表面上的蒸发凝结过程实现的, 等离子体电极的温度变化改变铯层的厚度, 图 5^[6] 显示了在不同铯馈入量情况下负离子电流随等离子体电极温度变化的情况, 由图可知, 随着等离子体电极温度的升高负离子一开始升高, 达到某一个值时会出现下降的现象, 在 200 mg 铯馈入量时最合适的温度为 250°C , 600 mg 时为 300°C , 这主要是因为随着等离子体电极温度的提高, 等离子体电极表面杂质也被蒸发如 O_2 , H_2O 等, 这些杂质使得等离子体电极表面铯氧化, 增加表面逸出功, 从而减少负离子产量. 为了达到最好的效果, 在 600 mg 铯馈入的情况下等离子体电极温度一般控制在 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 范围内.

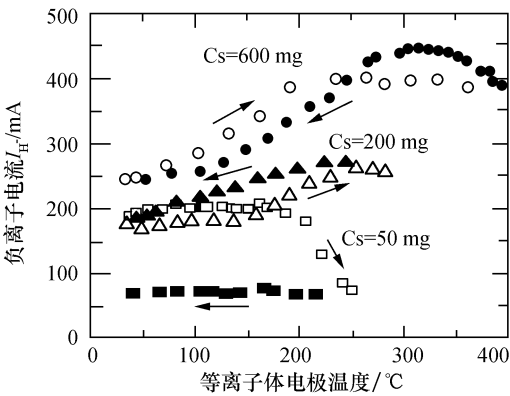


图 5 负离子电流随铯馈入量及等离子电极温度的变化

Fig.5 Negative ion current dependence of the plasma grid temperature and various injected cesium

3 结束语

发展 RF 负离子源是可控核聚变尤其是高能聚变的一个必然趋势,IPP 为了 ITER 装置于 2002 年 10 月在 RF 正离子源的基础上开始了 RF 负离子源的研究, 研究时间比较短, 虽然在 BATMAN、MANITU 及 RADI 上取得了一定的成果, 但对 RF 负离子源的了解还远远不够, RF 负离子源也将是中性束注入加热离子源今后的一个主要研究方向.

参考文献:

[1] 袁宝山, 姜韶风, 陆志鸿. 托卡马克装置工程基础 [M]. 北京: 原子能出版社, 2011.

[2] Staebler A, Fantz U, Franzen P, et al. Development of a RF-driven ion source for the ITER NBI system[J]. Fusion Eng. Des., 2009, 84(2-6): 265-268.

[3] Schiesko L, McNeely P, Franzen P, et al. Caesium influence on plasma parameters and source performance during conditioning of the prototype ITER neutral beam injector negative ion source[J]. Plasma Phys. Control. Fusion, 2011, 53(8): 085029.

[4] Franzen P, Falter H D, Fantz U, et al. Progress of the development of the IPP RF negative ion source for the ITER neutral beam system[J]. Nucl. Fusion, 2007, 47(4): 264-270.

[5] Speth E, Falter H D, Franzen P, et al. Overview of the RF source development programme at IPP Garching[J]. Nucl. Fusion, 2006, 46(6): 220-238.

[6] Miyamoto N, Fujiwara Y, Miyamoto K, et al. Steady state operation of an ampere-class hydrogen negative ion source[J]. Rev. Sci. Instrum., 2000, 71(2): 738-741.

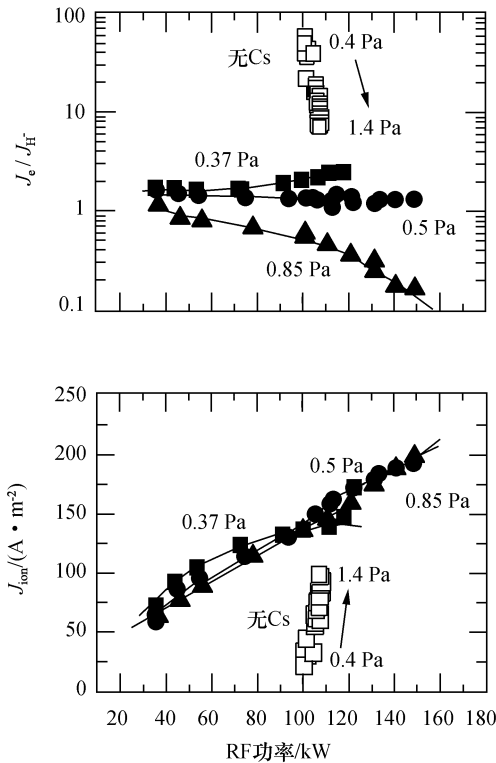


图 4 馈铯与未馈铯条件下离子电流密度及电子离子比率随 RF 源功率及压力的变化

Fig.4 Pressure and RF power dependence of the electrically measured current density and electron/ion ratio for discharges without and with Cs evaporation