

EAST-NBI 离子源电极打火分析及处理

许永建¹ 张黎^{1,2} 谢亚红¹ 蒋才超^{1,2} 梁立振¹ 胡纯栋¹

1 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2 (中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 强流离子源是 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)中性束注入器(Neutral Beam Injector, NBI)最核心的部件,其能达到的性能在很大程度上决定了 EAST 中性束注入器所能达到的指标。离子源在束引出时电极打火现象偶有发生,这对于离子源的正常运行有非常严重的影响,甚至危害离子源的寿命。本文结合离子源运行过程中的束引出实验波形和水流量热计(Water Flow Calorimetry, WFC)系统的测量数据得出等离子体发射面的束流光学系统一直处于非最佳聚焦状态是导致打火的原因,试通过优化高压投入时刻等离子体与高压的匹配,实现高压的稳定投入有效抑制打火现象的发生,并且给离子源加入硬件保护机制,为离子源安全稳定运行奠定基础。

关键词 离子源,束引出,电极打火,水流量热计

中图分类号 TL65⁺4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110603

Analysis and processing of breakdown of ion source for EAST neutral beam injector

XU Yongjian¹ ZHANG Li^{1,2} XIE Yahong¹ JIANG Caichao^{1,2} LIANG Lizhen¹ HU Chundong¹

1(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Background: The high current ion source is a key component of neutral beam injector, and its reachable performance determines the achievable targets of the experimental advanced superconducting tokamak (EAST) neutral beam injector (NBI). Electrode breakdown of ion source happens occasionally during the beam extraction, which has a very serious impact on the normal operation of ion source and even endangers the life of the ion source.

Purpose: This paper aims to analyze the reason of breakdown and propose improvement measures. **Methods:** The waveforms of beam extraction and the data of water flow calorimetry (WFC) of the abnormal shot of 7801 and normal shot of 7799 were studied. **Results:** The analysis shows that the cause of breakdown is the dual effect of over-focus and under-focus of extraction beam. Optimizing the matching of the plasma and the high pressure can effectively reduce the phenomenon of breakdown, and in order to protect ion source, a hardware protection mechanism is added. **Conclusion:** The analysis results lay a foundation for the safe and stable operation of ion source.

Key words Ion source, Beam extraction, Electrode breakdown, Water flow calorimetry

国家自然科学基金(No.11405207、No.11675215)、中国科学院等离子体物理研究所基金(No.DSJJ-15-GC03)资助

第一作者: 许永建, 男, 1977 年出生, 2009 年于中国科学院研究生院获博士学位, 现为副研究员, 主要从事中性束诊断及实验研究

通信作者: 谢亚红, E-mail: xieyh@ipp.ac.cn

收稿日期: 2017-02-24, 修回日期: 2017-06-07

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11405207, No.11675215), Institute of Plasma Physics Foundation of Chinese Academy of Sciences (No.DSJJ-15-GC03)

First author: XU Yongjian, male, born in 1977, graduated from Graduate University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2009, associate research fellow, focusing on neutral beam diagnosis and experimental research

Corresponding author: XIE Yahong, E-mail: xieyh@ipp.ac.cn

Received date: 2017-02-24, accepted date: 2017-06-07

在核聚变实验研究中,中性束注入加热(Neutral Beam Injection, NBI)是4种辅助加热手段中加热效率最高、物理机制最清楚的手段^[1-6]。在 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 磁约束实验装置上,设计两条中性束注入系统,分别为位于A窗口同向注入的NBI-1和F窗口反向注入的NBI-2。两套NBI装置的设计束能量为50-80 keV,束功率为2-4 MW,束脉宽为10-100 s。

为获得良好束参数的离子源,每台离子源在安装到EAST-NBI系统前,需要在NBI测试台上进行锻炼测试。每台离子源需要达到50 kV/100 s的长脉冲调制束引出和4 MW/1 s的高功率束引出^[7-8]。在2015年的EAST物理实验中,首次实现了两套NBI系统协同加热等离子体,并取得了很好的实验结果。

强流离子源是NBI系统中最精密的部件,在离子源运行过程中,引出电极打火现象偶有发生,尤其当等离子体放电参数和束引出电压不匹配时,束光学特性较差,打火现象会频繁发生^[9]。此时,束电极因杂散束的轰击会造成其温升异常,严重时可能引起电极损坏而漏水,造成整个NBI系统无法工作,带来巨大的损失。本文针对以上所提引起NBI发生打火的相关因素,结合相关的诊断手段,研究离子源发生打火的原因,为离子源的运行提供更加准确的指导,确保离子源的安全稳定运行。

1 离子源结构介绍

NBI系统的主要部件为:强流离子源、束传输系统、控制系统、束诊断系统、真空抽气系统、供气系统、水冷系统等。其中,离子源是NBI系统中最重要的核心部件,也是最精密的部件。NBI强流离子源主要由两大部分组成:一是用于产生大体积、稳定、均匀的高密度等离子体的等离子体发生器;二是用于引出等离子体中的离子以形成高能离子束的大面积多缝束引出系统(图1)。等离子体发生器包含了放电室(也称弧室)、作为放电阴极产生初始电子的灯丝、形成会切磁场用于约束初始电子和等离子体的永久磁体、作为放电极的反向电子吸收板等。束引出系统的作用是引出等离子体中的离子以形成高能离子束,其由4层电极形成的静电引出加速系统组成,分别是等离子体电极(Plasma Grid, PG)、梯度电极(Gradient Grid, GG)、抑制电极(Suppressor Grid, SG)和地电极(Exit Grid, EG)。

水流量热计(Water Flow Calorimetry, WFC)诊断是中性束注入系统对束线运行过程中引出束在各部件上的能量沉积进行测量的一种通用手段^[10]。它通过测量流经各待测部件的冷却水流量及冷却水进

回水温差,计算出各待测部件上的能量沉积,根据计算结果可确定束功率沉积分布。离子源的各引出电极均有水冷却管路,通过测量各层电极的进回冷却水温升,可以推测离子源在引出离子束时的运行情况。

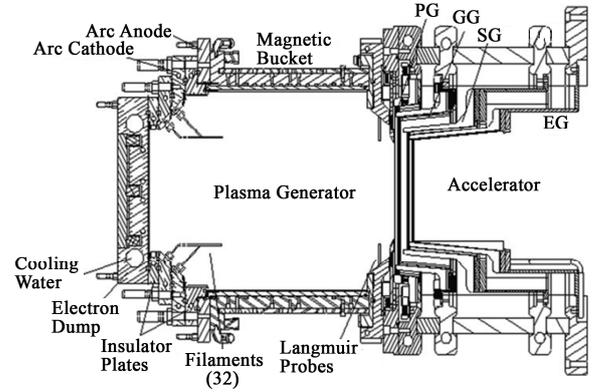


图1 EAST-NBI离子源原理结构示意图
Fig.1 Sketch of EAST-NBI ion source.

2 离子源束引出物理模型分析

理想平面二极管是束引出系统(三电极或四电极)的理论基础,束聚焦类似于膜孔透镜原理。对于缝形的孔栏,膜孔的焦距可用式(1)表示(Davison-Calbick)^[11]:

$$f \approx \frac{2V}{E_2 - E_1} \quad (1)$$

式中: V 是孔栏的电压; E_1 和 E_2 分别是孔栏左边和右边的场强。对于引出系统的第一电极,与等离子体接触,等离子体中电子和离子向电极运动,并形成鞘层。鞘层的形成即决定了其电场 E_1 的大小。电极右边的电场 E_2 由第一电极和第二电极间的电位差决定,可通过调节两电极间的电位差来调节引出束的焦距。等离子体第一电极对于引出束的发散角有重要的影响,一般根据等离子体的放电状态调节电极的电位来调节束的发射面,如图2所示。

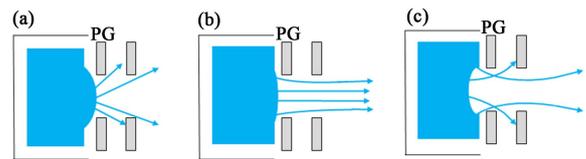


图2 束引出时的聚焦情况
(a) 欠聚焦, (b) 最佳聚焦, (c) 过聚焦
Fig.2 Types of beam focusing.
(a) Under-focus, (b) Optimum focus, (c) Over-focus

在束引出过程中,引出电压是一定的,当等离子体密度保持恒定时,假设此时为最佳引出电压 V^* 。当且只有在引出电压 V 与 V^* 相等时,束流光学系统达到最佳匹配状态,使发射面形成最佳聚焦位置,引出束散角最小(图 2(b))。当引出电压与最佳电压不相等时,束引出过程的聚焦情况主要分为两个过程:当 $V < V^*$ 时,等离子体密度相对过大,发射面呈凸状,形成欠聚焦,如图 2(a)所示;反之, $V > V^*$ 时,等离子体密度相对过小,发射面呈凹状,形成过聚焦,如图 2(c)所示^[12]。分析可知,当束引出时呈过聚焦或欠聚焦时,引出束的发散束会打在电极上,同时产生较多的二次电子,如图 3 所示。

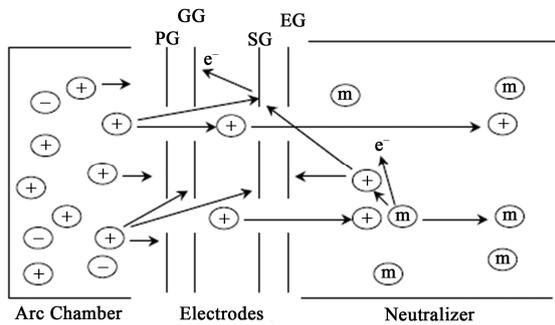


图 3 束引出过程中离子与电极的碰撞示意图
Fig.3 Schematic diagram of collision between ions (electron) and grids.

束引出过程中,各加速电极温升原因(图 3)如下:1)对于 PG,它的温升来源于弧室内的等离子体的热量沉积,以及加速离子与 GG 碰撞产生的二次电子反向加速轰击产生的热量沉积;2)对于 GG,热量沉积主要是加速离子的碰撞以及加速离子与 SG 碰撞产生的二次电子反向加速后的轰击;3)对于 SG,热量沉积主要来自于发散加速离子的轰击;4)对于 EG,主要的温升来自于加速离子对它的轰击^[13]。因此,各加速电极温升明显异常是因为

打在各电极上的加速离子和加速离子与电极碰撞产生的二次电子急剧增多造成的。在离子源异常运行情况下,带电粒子轰击电极会造成其温升异常,利用 WFC 诊断系统可以定性判断电极温升异常的区域,为研究离子源发生打火的原因给予定性的分析。

3 实验现象分析与处理

在一系列中性束注入实验中,偶有电极打火现象发生,本文选取了电极温升异常的一炮(炮号:7801),并选取了初始设定参数相同且正常束引出的 7799 炮作对比,通过研究两炮的电极温升差异,得出其离子源运行异常的可能原因。两炮的离子源运行参数由表 1 给出,图 4 给出了束引出时相关参数的波形图。

由表 1 可知,在离子源初始设置参数几乎完全一致的情况下,7801 和 7799 这两炮的实测参数值的灯丝电压、弧流、高压电流和抑制极电流有差异,两者的设定脉冲均为 3 s,但在实际束引出过程中,炮号为 7801 的在束加载期间出现参数不匹配,从而导致束发散,杂散束会轰击到引出电极上,产生二次电子并反向加速轰击电极造成更差的束光学。图 4 为束引出过程的实验波形图,由图 4(a)可清楚看到整个放电过程中两炮参数的变化情况:在起弧阶段,两炮的参数没有明显的区别,但在束引出即加上高压后,7801 炮的抑制极电流约是 7799 炮的 4 倍,它的高压电流峰值也达到了近 100 A,高压电流过流保护中止束运行,该炮仅持续了 0.3 s。图 4(b)为束引出瞬间放电波形的局部放大图,可以看出,在引出瞬间,7801 炮的弧流明显高于 7799 炮,且它的探针电流所达到的最小值明显比 7799 炮小很多,并且在探针电流趋于稳定时,7801 炮的数值也明显较高。

表 1 离子源的运行参数
Table 1 The operating parameters of ion source.

炮号 Shot number	7801	7799
灯丝电压 Filament voltage / V	7.95	7.95
灯丝电流 Filament current / A	3 060	3 060
弧压 Arc voltage / V	98	123
弧流 Arc current / A	634	626
抑制极电压 Sup voltage / kV	-1.7	-1.7
抑制极电流 Sup current / A	7	1.7
高压 Accelerating voltage / kV	58	58
高压电流 Accelerating current / A	28	35
脉冲长度 Pulse length / s	0.3	3

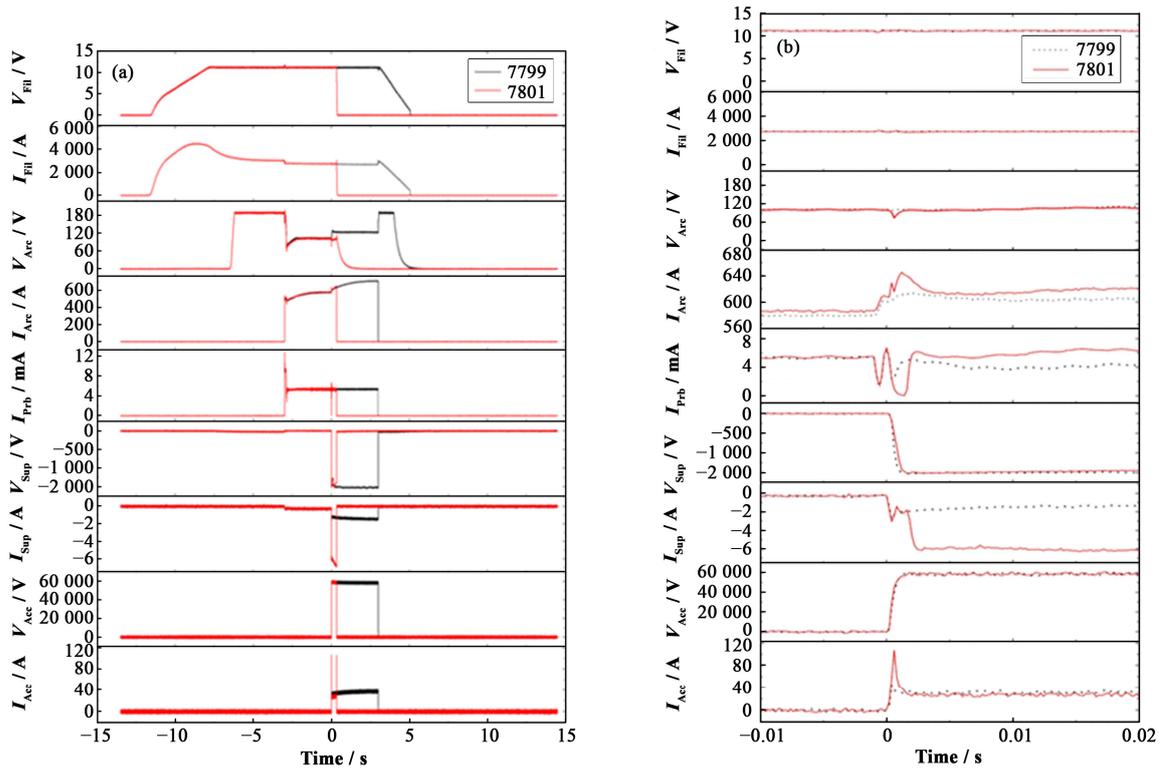


图4 束引出的实验波形 (a) 各参数的放电波形图, (b) 引出瞬间局部放大图
Fig.4 The waveforms of beam extraction. (a) The electrical parameters of beam extraction, (b) Local amplification of electrical parameters of beam extraction

为进一步分析造成电极打火的原因,利用 WFC 测得的数据对束引出过程中各加速电极的温升进行分析。在束引出过程中,用 WFC 系统采集到的 7799 炮与 7801 炮的电极温升情况如图 5 所示: 1) 在正常情况下, PG 温升最高, EG 温升最小且没有超过 1°C ; 2) 在打火时,除等离子体电极外,其他三个电极的温升都明显异常,尤其是 EG,它的温升约为 PG 的三倍; 3) 在实测的温升图中可以明显看出打火炮的 SG 温升比正常炮的要高出很多,与表 1 中的抑制极电流较高相互验证。

为进一步分析在束引出时的打火情况,研究束引出瞬间的各参数变化情况(图 4(b))。在束引出初始阶段,两炮的探针电流变化和抑制极电流变化一致,7801 炮的探针电流本应在下降到一定时跟 7799 炮一样上升,但其探针电流却继续下降到更低点,在达到最低点时,7801 炮的抑制极电流却急剧变大,这是因为等离子体密度过小导致等离子体发射面呈凹状形成过聚焦导致的。与此同时,过聚焦使束打在电极上的离子增多,产生更多的二次电子经反向加速进入弧室,使放电室电离度进一步增加,等离子体密度升高。等离子体密度过大导致发射面呈凸状形成欠聚焦,离子源无法建立一个稳定的束流光学状态。从图 4 中可以看出,异常炮的探针信

号在后期始终高于正常炮,导致束流光学系统一直处于欠聚焦状态,最终导致电极间打火,放电终止。

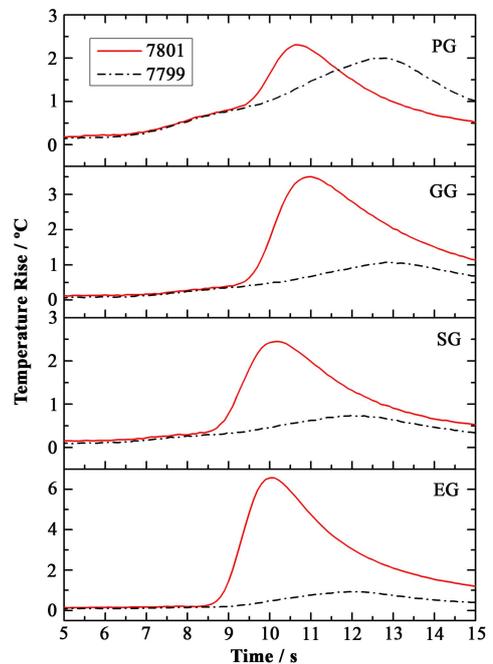


图5 EAST-NBI 离子源各加速电极的温升
Fig.5 The cooling water temperature rise of accelerating electrodes.

4 讨论和结语

本文通过对束引出初期的束光学及束流在引出电极上的热量沉积分析, 结合 7799 炮和 7801 炮的束引出波形和 WFC 数据, 研究了离子源打火过程中的主要过程。在束建立初期等离子体密度过低导致束过聚焦, 过聚焦使打在电极上的加速离子增多产生更多的二次电子进入弧室, 放电室内的电离度增加导致其等离子体密度较高形成欠聚焦且一直处于此状态。在束引出前, 正常炮与异常炮无明显区别, 但在束引出瞬间即加上高压后, 7801 炮的参数波形较 7799 炮发生了明显变化, 说明高压投入期间, 高压的上升和密度的上升不匹配, 使得离子源运行参数发生了异常变化导致电极打火。为了避免这样的情况出现, 需优化高压投入时刻等离子体与高压的匹配, 降低外界对离子源运行参数的干扰, 从而实现高压的稳定投入。由于离子源打火无法避免, 为了尽可能地降低打火对离子源电极的损伤, 考虑为离子源加入硬件保护机制, 如在抑制极回路中加入 di/dt 保护模块并设定保护阈值, 当电流突变超过阈值, 切断高压终止束引出, 以免对离子源电极产生损害。

参考文献

- Hu C D, Xie Y H, Xie Y L, *et al.* Overview of development status for EAST-NBI system[J]. *Plasma Science and Technology*, 2015, **17**(10): 817–825. DOI: 10.1088/1009-0630/17/10/02.
- Wan B N, Teams H T. Recent experiments in the EAST and HT-7 superconducting tokamaks[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, **49**(10): 593–598. DOI: 10.1088/0029-5515/49/10/104011.
- 许永建, 栗翔, 胡纯栋, 等. EAST-NBI 反向电子吸收板换热计算与分析[J]. *核技术*, 2016, **39**(10): 100602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100602.
XU Yongjian, LI Xiang, HU Chundong, *et al.* Analysis of heat transfer capacity of electron dump on EAST-NBI[J]. *Nuclear Techniques*, 2016, **39**(10): 100602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100602.
- Xie Y H, Hu C D, Liu S, *et al.* Upgrade of accelerator of high current ion source for EAST neutral beam injector[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2015, **100**: 265–268. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.058.
- Hu C D, Xu Y J, Xie Y L, *et al.* The recent development of the EAST neutral beam injector[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, **32**(5): 39–42. DOI: 10.1088/0256-307X/32/5/052901.
- Xu Y J, Hu C D, Xie Y L, *et al.* A new method of rapid power measurement for MW-scale high-current particle beams[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2015, **795**: 196–199. DOI: 10.1016/j.nima.2015.05.061.
- 胡纯栋, 许永建. EAST 中性束注入器最新研制进展[J]. *核技术*, 2015, **38**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110603.
HU Chundong, XU Yongjian. The latest development of EAST neutral beam injector[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110603.
- Hu C D, Team NBI. Achievement of 100 s long pulse neutral beam extraction in EAST neutral beam injector[J]. *Plasma Science and Technology*, 2013, **15**(3): 201–203. DOI: 10.1088/1009-0630/15/3/01.
- 陈宇, 胡纯栋, 许永建, 等. EAST 中性束注入器水流热量累积测量系统误差分析[J]. *核技术*, 2016, **39**(3): 030602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.030602.
CHEN Yu, HU Chundong, XU Yongjian, *et al.* Error analysis of water flow calorimetry system of EAST neutral beam injector[J]. *Nuclear Techniques*, 2016, **39**(3): 030602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.030602.
- Hong R, Kellman D, Santamaria G, *et al.* Beam current regulation of DIII-D neutral beam long pulse ion source[J]. 13th IEEE Symposium on Fusion Engineering, 1989, **2**: 987–990. DOI: 10.1109/fusion.1989.102383.
- Coupland J R, Green T S. Ion-beam deflection in extraction electrodes[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1975, **125**: 197–199. DOI: 10.1016/0029-554X(75)90574-1.
- 赵玉清. 电子束离子束技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
ZHAO Yuqing. Technology of electron beam and ion beam[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- Xu Y J, Hu C D, Xie Y L, *et al.* Analysis of the cooling water temperature rise of accelerating electrodes in EAST neutral beam injector beam extraction[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(3): 399–406. DOI: 10.1088/0256-307X/30/3/032901.