EAST 中性束注入器研制进展

胡纯栋　许永建
（中国科学院等离子体物理研究所　合肥 230031）

摘要　EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)作为世界上第一个全超导非圆截面托克马克，其目标是研究 1 000 s 的长脉冲稳态运行的前沿性物理问题，要达成这一目标，必须有高功率电流驱动和辅助加热系统以实现 EAST 装置的高参数稳态运行。中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热是等离子体辅助加热和维持最有效的手段之一，为此一套注入功率 4–8 MW、脉冲宽度 10–100 s 的中性束注入系统于 2010 年开工建设，并于 2014 年实现了对等离子体的加热和驱动。本文主要展示了 EAST 中性束注入器的最新进展，从长脉冲束引出和高功率束引出两个方面介绍了 EAST 中性束注入器综合测试台的最新实验结果，结果表明在束功率和脉冲宽度方面已经达到或超过设计指标。

关键词　中性束注入器，束引出，离子源

中图分类号　TL61⁺2.11　　**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110603

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)装置是我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，其设计指标为 1 000 s 稳定运行，对稳态磁约束聚变的前沿问题进行相关研究[1]。为实现这一目标，需研制可长脉冲运行的辅助加热和电流驱动系统[2]。因此一套注入功率 4–8 MW、10–100 s 中性束注入系统于 2010 年开工建设，并于 2014 年成功实现了对等离子体的加热和电流驱动。

1　EAST 中性束注入器组成

依据 EAST 的研究计划，中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)系统分为两条束线，在 EAST 装置上的布局如图 1 所示。每条束线具有独立的电源、控制、真空以及诊断系统等，可单独工作并产生最大功率为 4 MW，束能量为 50–80 keV，脉冲宽度为 10–100 s 的氘中性束，其内部构成[3–6]如图 2 所示。其中每条束线均安装两个离子源，离子源作为 NBI 装置中最关键部件之一，其功能是产生等离子体并实现对其中的正离子加速。EAST-NBI 采用了热阴极大面积桶式源。离子源包括弧室和加速电极两部分，其设计的束引出面为 120 mm×480 mm。其中加速电极采用四电极静电引出加速系统，分别是等离子电极(Plasma Grid, PG)、梯度电极(Gradient Grid, GG)、抑制电极(Suppression Grid, SG)和地电极(Earth Grid, EG)。为提高电极的主动冷却能力，电极采用中空钼管加工制成，中空管道通有去氧去离子水冷却。为进一步提高 NBI 加热效率，在不改变离子源的结构的情况下提高束引出能力，PG 的横截面由原来的圆形改为菱形(图 3)。经过测试，实验结果表明离子源的束引出能力有了较大的提高。

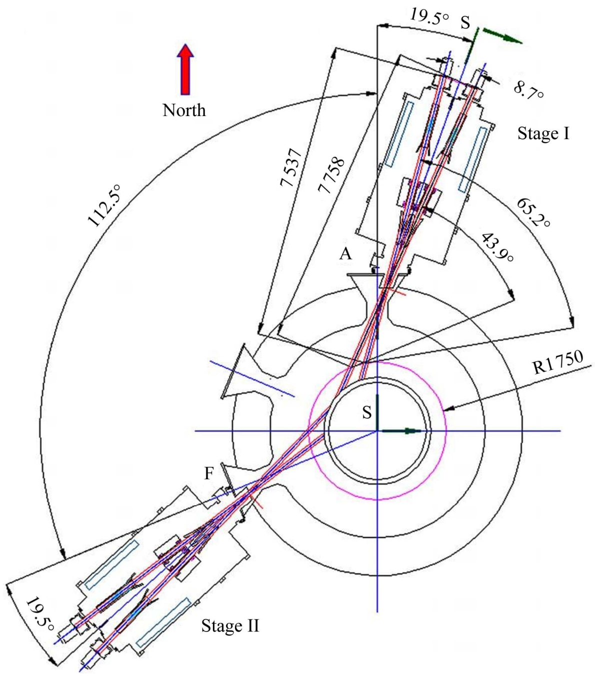

图 1　中性束注入器在 EAST 装置上的布局
Fig.1　Layout of the neutral beam injector system in EAST.

国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2013GB101001)资助
第一作者：胡纯栋，男，1963 年出生，1999 年于中国科学院等离子体物理研究所获博士学位，现主要从事中性束物理与实验研究
通讯作者：许永建，E-mail: yjxu@ipp.ac.cn
收稿日期：2015-03-25，修回日期：2015-07-29

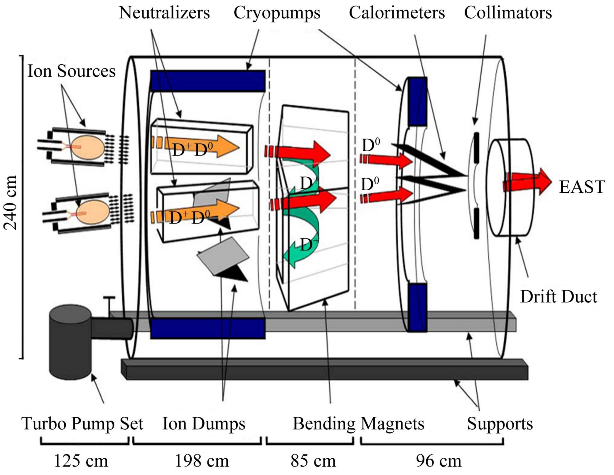

图 2 EAST 中性束注入器结构
Fig.2 Schematic view of EAST-NBI.

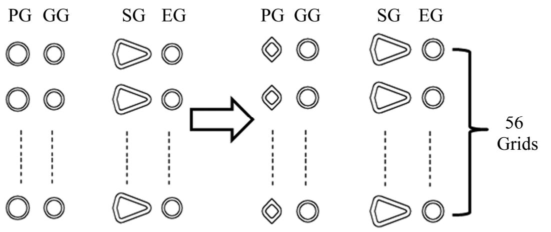

图 3 EAST-NBI 离子源加速电极最新改进示意图
Fig.3 Improvement of accelerating electrode of EAST-NBI ion source.

2 EAST 中性束注入器的性能测试

2.1 长脉冲束引出测试

EAST 为了实现高参数运行，对各辅助加热手段提出了更高的要求，对 EAST-NBI 提出了长脉冲（稳态）运行的要求，为此我们测试了 EAST-NBI 长脉冲束引出的能力。图 4 给出了 150 s 长脉冲的波形图，图 4 中 V_{fil} 为灯丝电压，I_{fil} 为灯丝电流，V_{arc} 为弧压，I_{arc} 为弧流，V_{acc} 为加速电压，I_{acc} 为束流，V_{sup} 为抑制电极电压，I_{sup} 为抑制电极电流。为配合束流的引出，在对加速电压进行调制的同时要保证弧压、抑制电极电压要与加速电压同步。由图 4 可知，当加速电压为 50 kV、弧功率为 52.5 kW 时，弧效率为 0.57 A·kW^{-1}。等离子体电极由圆形改为菱形，提高了离子源的束引出能力，减小了束散角，降低了束通道内热承载部件的换热压力，同时束调制技术的采用，也有效地减轻了束通道内热承载部件的换热压力，上述因素使长脉冲束引出成为可能。

2.2 高功率束引出测试

为测试 EAST 中性束注入器的高功率束引出能力，我们测试了单离子源 4 MW 离子束引出。图 5 给出了在该参数下的波形图。从图 5 中可以看到，离子源引出功率达到了其设计指标。

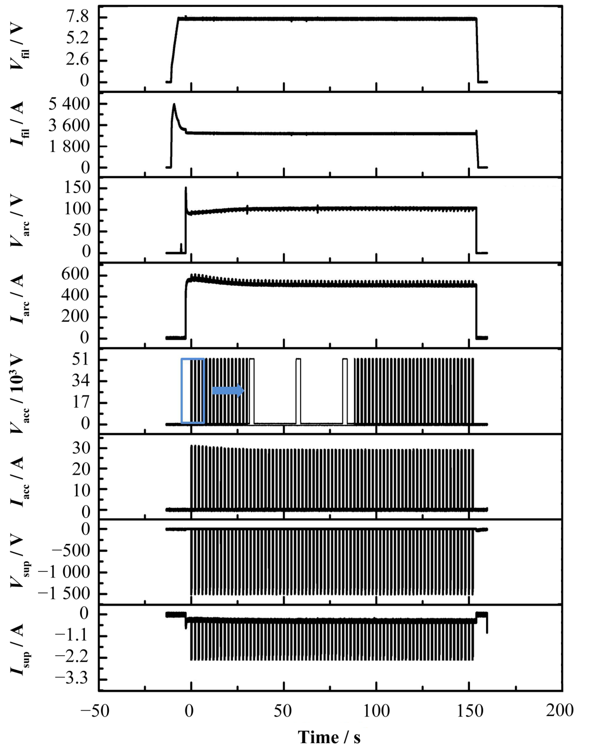

图 4 150 s 长脉冲束引出波形图(50 kV, 30 A, 150 s 调制)
Fig.4 Waveform of 150 s long pulse beam extraction (50 kV, 30 A, 150 s, modulating).

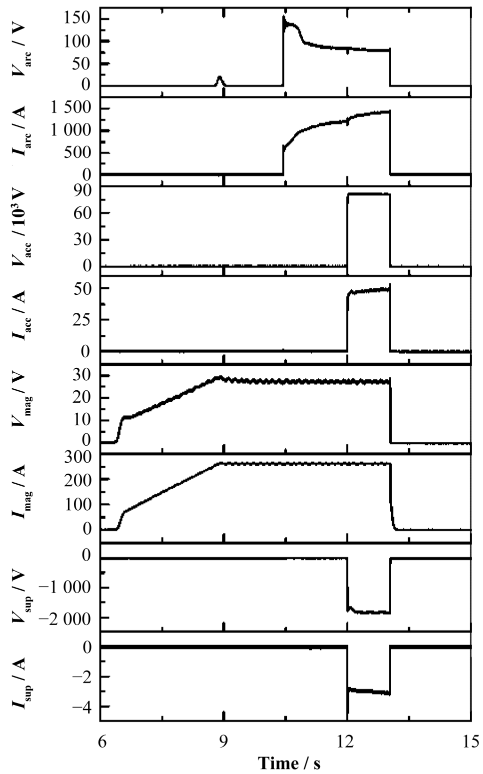

图 5 高功率束引出实验波形(4 MW, 80 keV, 50 A)
Fig.5 Waveforms of high power beam extraction (4 MW, 80 keV, 50 A).

2.3　束关键参数测量

为测量束流在热承载部件下的沉积功率，我们利用水流热量量积测量系统对其进行了测试[7–8]，图 6 给出了在偏转磁铁通断情况下热承载部件上沉积功率占总功率的百分比。束流的中性化效率随着电压的升高呈下降趋势（见图 7），通过改变中性化室的进气量还可以进一步优化中性化效率。核聚变研究希望从离子源中引出的离子束的质子比尽可能高，但分子离子依然存在，为测量束的质子比，利用多普勒光谱测量系统对束流进行了测量，图 8 给出了束能量与质子比的关系，由图 8 可以看到全能量的质子比随着束能量而增大。图 9 给出了 PG 改进前后的对比，从图 9 可以看出，PG 由原来的圆形改为菱形后，离子源的最佳运行区间变宽，束引出效率提高同时最佳束散角变小。

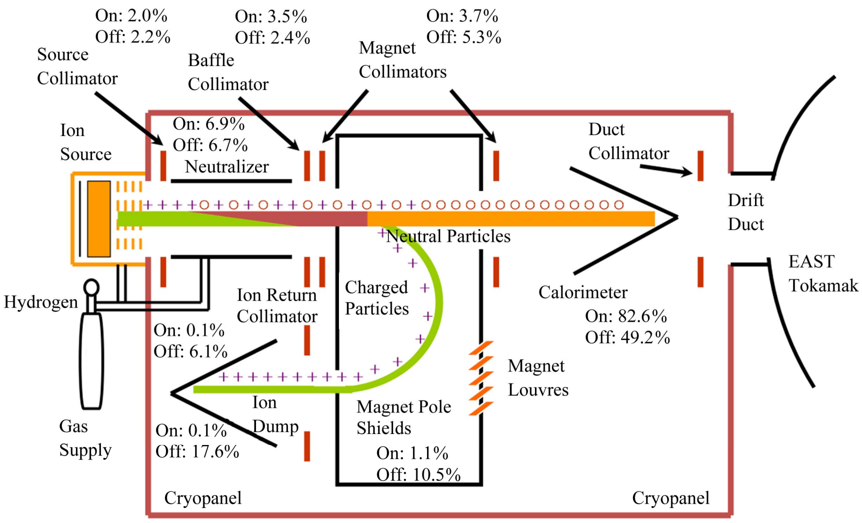

图 6　束流在热承载部件上的功率沉积

Fig.6　Beam power deposition distribution on the heat load components.

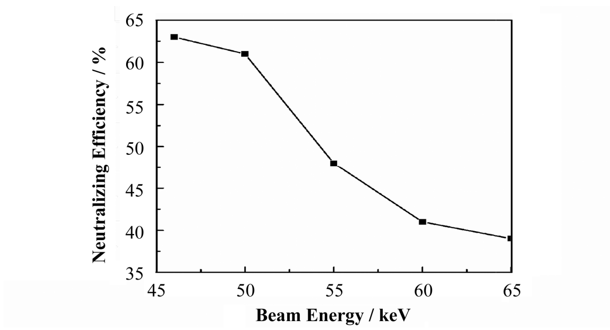

图 7　不同束能量的中性化效率（中性化室未进气，工作气体为$^{1}_{1}H$）

Fig.7　Neutralizing efficiency as a function of beam energy (without neutralizer gas puff, for hydrogen).

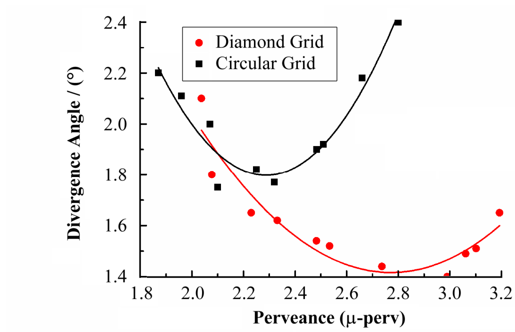

图 9　束散角随导流系数的变化曲线

Fig.9　Divergence angle as a function of perveance.

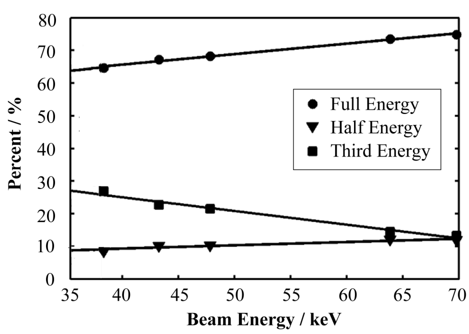

图 8　束成分与束能量之间的关系

Fig.8　Relationship between beam species and beam energy.

3　结语

中性束注入系统作为国家“九五”重大科学工程全超导托卡马克实验装置(EAST)的高功率辅助加热和电流驱动的主要组成部分之一，在综合测试台上已经完成各项指标的测试，结果表明束功率和脉冲宽度已达到或超过了设计指标，为在 EAST 上开展近堆芯等离子体物理与工程研究奠定了坚实的基础。

致谢　感谢中国科学院等离子体物理研究所中性束注入课题组全体成员对本实验给予的支持。

参考文献

1　Wan Y X, Li J G, Weng P D. First engineering commissioning of EAST tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2006, **8**(3): 253–254. DOI: 10.1088/1009-0630/8/3/01

2　Ciric D, Brown D P D, Challis C D, *et al*. Overview of the JET neutral beam enhancement project[J]. Fusion Energy Design, 2007, **82**(5–14): 610–618. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.07.046

3　经浩, 胡纯栋, 李军, 等. 兆瓦级强流离子源地电极的位置度检验方法[J]. 核技术, 2013, **36**(5): 050206. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.050206

JING Hao, HU Chundong, LI Jun, *et al*. Test method for position of accelerate grid of megawatt level high current ion source[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(5): 050206. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.050206

4　Xu Y J, Hu C D, Liu S, *et al*. Preliminary experimental study of ion beam extraction of EAST neutral beam injector[J]. Chinese Physics Letters, 2012, **29**(3): 035201–035204

5　Hu C D, Team N. Preliminary results of ion beam extraction tests on EAST neutral beam injector[J]. Plasma Science and Technology, 2012, **14**(10): 871–873. DOI: 10.1088/1009-0630/14/10/03

6　Hu C D, Xie Y H, Team N. The development of a megawatt-level high current ion source[J]. Plasma Science and Technology, 2012, **14**(1): 75–77. DOI: 10.1088/1009-0630/14/1/16

7　Kuriyama M, Akino N, Ebisawa N, *et al*. Power flow in the negative-ion based neutral beam injection for JT-60[J]. Review of Science Instrument, 2000, **71**(2): 751–754. DOI: 10.1063/1.1150283

8　Chiu H K, Noraky S, Hong R M. A network based telemetry upgrade for the DIII-D neutral beam power diagnostics[J]. Fusion Science Technology, 2007, **52**(4): 1051–1055. DOI: 10.13182/FST52-1087

Development progresses of EAST neutral beam injector

HU Chundong　XU Yongjian

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

Abstract　Background: As the first full superconducting non-circular cross section Tokomak in the world, Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) is used to explore the forefront physics and engineering issues on the construction of Tokomak fusion reactor. Neutral beam injection has been recognized as one of the most effective means for plasma heating. **Purpose:** This paper aims to present the latest progresses of EAST neutral beam injector. **Methods:** Long pulse beam extraction and high power beam extraction were experimentally tested to verify the performance of a set of neutral beam injectors (4–8 MW, 10–100 s) which were developed and put into operation in 2014. **Results:** Test results showed that beam power and pulse length met or exceeded the design requirments. **Conclusion:** All these progresses lay a solid foundation for the achievement of plasma heating and current drive for EAST in the future.

Key words　Neutral beam injector, Beam extraction, Ion source

CLC　TL61^{+}2.11