

中性粒子分析仪的研究现状

林炜平^{1,*}, 马 龙¹, 汪彦熹¹, 屈玉凡², 罗 圆², 谢德豪¹, 王 硕¹, 曲国峰¹, 任培培¹,
罗小兵¹, 刘星泉¹, 韩纪锋¹, Roy WADA³, 臧临阁^{2,*}, 朱敬军^{1,*}

(1. 四川大学 原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064;

2. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610218; 3. Texas A & M University, Texas USA 77843)

摘要: 中性粒子分析仪(NPA)作为托卡马克(Tokamak)装置的重要诊断工具, 在等离子体物理研究中具有重要科学意义和广泛应用前景。NPA通过精确测量从等离子体中逃逸的中性粒子, 可获取等离子体内部的关键信息, 包括离子温度、快离子能谱分布和氢同位素比例等。自20世纪60年代首台NPA问世以来, 经过60余年的技术发展, 其诊断能力已经实现了质的飞跃, 并且发展出了多种类型的NPA。针对中国环流3号(HL-3)装置的快离子物理研究, 四川大学与核工业西南物理研究院联合研制了基于LYSO+SiPM探测器的串联式平行电磁场结构的NPA(E/B NPA)。该E/B NPA已安装到HL-3装置, 并在等离子体放电实验中成功测量到高能氘(D)中性粒子能谱, 为今后HL-3装置中性粒子诊断及快离子研究奠定了坚实的技术基础。

关键词: 中性粒子分析仪; 能量和质量分辨; 托卡马克; 快离子物理

中图分类号: TL659 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2024)S2-0501-11

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0437

Present Status of Neutral Particle Analyzer

LIN Weiping^{1,*}, MA Long¹, WANG Yanxi¹, QU Yufan², LUO Yuan², XIE Dehao¹, WANG Shuo¹,
QU Guofeng¹, REN Peipei¹, LUO Xiaobing¹, LIU Xingquan¹, HAN Jifeng¹,
Roy WADA³, ZANG Lin'ge^{2,*}, ZHU Jingjun^{1,*}

(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education,

Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610218, China; 3. Texas A & M University, TX 77843, USA)

Abstract: The neutral particle analyzer (NPA) serves as a crucial diagnostic tool in Tokamak devices, providing valuable insights in plasma physics with wide-ranging applications. By accurately measuring neutral particles that escape from the plasma, the NPA allows for the retrieval of key plasma information, including ion temperature, high-energy particle spectra, and hydrogen isotope ratios. Since its introduction as the first NPA, originally known as a neutral atom analyzer, in the 1960s, this diagnostic instrument had significantly advanced over the past six decades, resulting in the development of various NPA types. In order to address fast ion physics research on HL-3 device, Sichuan University

收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-07-03

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2018YFE0310200); 国家自然科学基金(11805138, 12175156)

* 通信作者: 林炜平, 臧临阁, 朱敬军

and Southwestern Institute of Physics have collaboratively developed a tandem parallel electromagnetic field structure NPA (E//B NPA) based on LYSO+SiPM detectors. This E//B NPA has been successfully installed on the HL-3 device, enabling the accurate measurement of the high-energy deuterium neutral particle spectrum during plasma discharge experiments. This achievement establishes a strong technical foundation for future neutral particle diagnostics and fast ion research on the HL-3 device.

Key words: neutral particle analyzer; energy and mass resolution; Tokamak; fast ion physics

中性粒子分析仪(NPA)^[1-20]作为一种用于测量磁约束托卡马克(Tokamak)装置^[21-37]等离子体中离子种类和能量分布的关键诊断工具,具有重要的科学意义和应用前景。NPA通过测量从等离子体中逃逸出来的中性粒子能量和(或)质量,能够提供关于等离子体性质的关键信息,包括离子温度、能谱和(或)氢同位素比例等。这些信息对于理解等离子体行为、优化聚变反应条件以及研究聚变反应过程至关重要。

自20世纪60年代以来,NPA在聚变科学技术领域中发挥了重要作用。世界上首台NPA^[1,6]在苏联的Ioffe研究所诞生,该NPA能够测量能量范围在250 eV~40 keV之间的中性粒子,为磁约束聚变研究提供了重要的中性粒子诊断手段。随着聚变科学技术的发展,托卡马克装置的性能得到了显著提升。1984年,欧洲联合环状反应堆(Joint European Torus, JET)实现了等离子体电流达到3.7 MA并能够维持数秒的壮举,这一成就标志着聚变研究在等离子体稳定性和约束能力方面取得了重大突破。紧接着,在1986年,美国的托卡马克聚变试验堆(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)通过使用16 MW的大功率氩中性束注入技术,成功获得了中心离子温度高达2亿度的等离子体^[38]。我国的大型托卡马克装置在近几年也取得了多项成果,全超导托卡马克核聚变实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)^[23,39-40]获得了稳定重复的1 MA等离子体放电,于2021年12月30日实现长脉冲高参数等离子体运行1056 s^[41],并于2023年4月12日实现403 s稳态高约束运行模式(H模)等离子体,继2017年实现101 s H模等离子体^[40]后再创H模运行最长时间记录。中国环流3号(HL-3)装置^[42]于2023年8月首次实现了1 MA等离子体电流H模运行,这一突破性进展意味着我国在探索实现聚变等离子体的高约束稳定运行方面迈出了重

要一步。

随着托卡马克装置在聚变能源研究领域取得的显著进展,通过氘氚(DT)聚变反应获得能源已成为可能,这对NPA的性能提出了更为严苛的要求。当前,托卡马克装置等离子体中的离子能量已攀升到数十至数百keV,而在未来DT聚变反应中,会有MeV能量的快离子产生,这使得NPA必须具备宽能量范围测量能力。此外,DT同位素的比例会影响等离子体的高效燃烧,对等离子体中的氘氚燃料比进行监测是保障燃烧等离子体运行的关键,这也对NPA提出分辨中性粒子质量的要求。由于物理目标的差异和工程结构的限制,NPA的发展也出现了多样化,包括针对兼具能量和质量分辨的平行电磁场结构中性粒子分析仪(E//B NPA)^[3-5,7-8]、紧凑型积分通量测量的固态中性粒子分析仪(solid state Neutral Particle Analyzer, ssNPA)^[11-16]和针对快离子测量的成像中性粒子分析仪(Imaging Neutral Particle Analyzer, INPA)^[17-20]等。其中,E//B NPA是发展最成熟、应用最广泛的一类,具有质量和能量分辨能力,能够测量离子能谱、燃料比、 α 粒子能谱等重要数据。ssNPA和INPA发展较晚,相比更成熟的E//B NPA,它们的结构相对更简单、体积更小、价格也更便宜,但功能不如E//B NPA全面。ssNPA主要用于多道测量快离子的空间和时间分布,具有高时间、空间和能量分辨率,但不具备质量分辨能力。INPA主要用于测量托卡马克等离子体中快离子的能量、空间和时间分布,具有高空间分辨率。

本文对NPA的研究现状进行综述。

1 E//B NPA

在20世纪八、九十年代,随着中性束和射频波等辅助加热手段普遍在托卡马克装置上运用,在托卡马克装置中出现了多种能量分布和离子种类的等离子体。当时已发展出了电场和磁场正交

的 NPA^[2], 由于采用正交电磁场, 使得 NPA 无法同时测量不同种类的离子。而当时的 TFTR^[24] 已采用多组分氘同位素放电, 并且利用离子回旋波 (ion cyclotron radio frequency, ICRF) 加热来产生高能离子, 对 NPA 提出了同时分辨中性粒子能量和质量的需求。在该背景下, 普林斯顿等离子物理实验室 (PPPL) 提出了一种电场和磁场平行的新型电荷交换 NPA 概念, 并研制了半圆形平行电磁场结构的 NPA^[8], 如图 1a 所示。该 NPA 采用 25 cm 长的气体剥离室, 充入气体量为 $(1.47 \sim 4.41) \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^2$ 的 He 气作为剥离介质将中性粒子剥

离成带电离子; 两块半圆形磁极同时作为电极, 在半圆形区域内形成平行电磁场, 对剥离后的带电离子进行能量和质量分析; 采用大面积微通道板来测量飞离电磁场离子的位置信息, 包含 3 条半连续矩形带, 分别用来测量 H^+ 、 D^+ 和 T^+ ($^3\text{He}^+$) 离子, 每条矩形带有 75 个能量通道, 能够测量 $0.5 \text{ keV} < AE < 600 \text{ keV}$ (A 为离子的质量数, E 为离子能量) 能量范围的离子。图 1b 为该 E/B NPA 在 TFTR 装置 D 等离子体放电时测量的 D 中性粒子能谱随时间的变化, 当有中性束加热时, D 中性粒子的能量分布向高能区扩展。

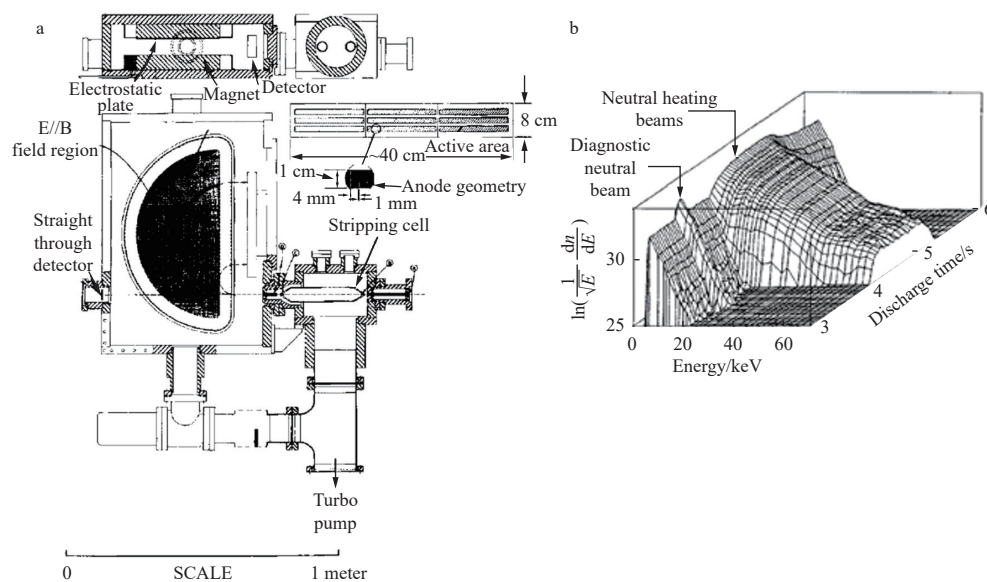


图 1 PPPL 研制的 E/B NPA(a) 及 5~70 keV 的 D 中性粒子能谱随放电时间的变化(b)^[8]

Fig. 1 Schematic of E/B NPA developed at PPPL (a) and deuterium spectrum vs. time in energy range of 5-70 keV (b)^[8]

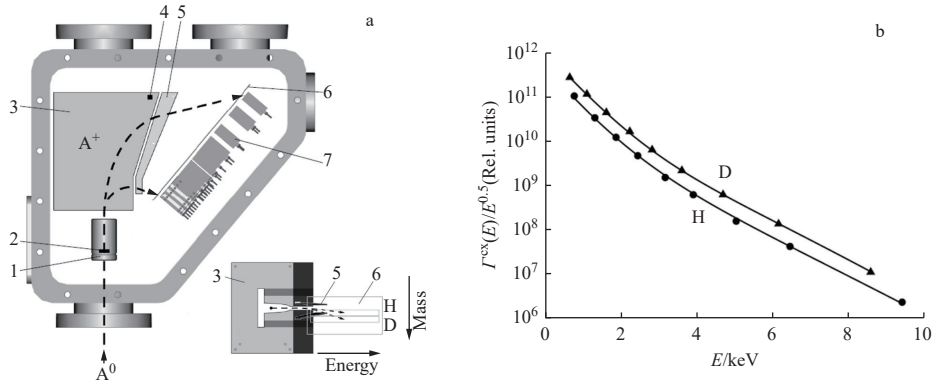
同时期, 为了满足 JET 装置对 DT 聚变等离子体氢同位素比例监测及快离子研究需求, 俄罗斯 Ioffe 研究所相继研制了串联式平行电磁场结构的高能量 NPA^[3] 和同位素分离器 (isotope separator, ISEP)^[4]。其中高能量 NPA 主要针对 MeV 能量离子及其他高能离子诊断, ISEP 主要的目标是监测 DT 聚变氢同位素比例。它们均采用类金刚石薄碳膜 (DLC) 对中性粒子进行剥离, 其中 ISEP 为了提高低能量离子的信噪比和探测效率, 在碳膜上加了 0~100 kV 的正电压对剥离后的离子进行加速和聚焦; 探测单元均采用薄 CsI(Tl) 闪烁体耦合光电倍增管 (PMT) 作为探测器。它们为 JET 装置开展 DT 聚变研究及快离子物理研究提供了离子温度、能谱、同位素比例等关键信息, 也为后来

国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 的 NPA 积累了丰富的经验。

随着聚变研究的发展, 为了提高窗口的利用率、简化 NPA 的安装维护、减小中子/ γ 的屏蔽体体积等, 提出了研制紧凑型 NPA 的需求。在该需求牵引下, Ioffe 研究所完成了紧凑型 NPA (compact NPA, CNPA) 的研制^[7], 如图 2a 所示。CNPA 采用了与 ISEP 相同的 DLC 对中性粒子进行剥离, 并施加 +5 kV 高压来提高低能量离子的探测效率。分析单元采用钕铁硼永磁体作为分析磁场, 将设备的整体尺寸减小到了 $169 \text{ mm} \times 302 \text{ mm} \times 326 \text{ mm}$, 总质量只有 42.5 kg, 并且永磁体的磁极在离子出口处收缩, 使得磁场对带电离子有聚焦

功能。探测单元由两列通道电子倍增器 (CEM) 组成, 分别用来探测 H 和 D, 能量测量范围分别为 0.8~80 keV(H) 和 0.66~36 keV(D)。图 2b 为 CNPA 在德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所的

Wendelstein 7-AS 仿星器上测量的 H 和 D 中性粒子能谱。实验中采用氢-氘混合等离子体, 根据测量的能谱可以估算出等离子体中 H⁺ 和 D⁺ 离子温度均约为 0.8 keV、H/D 同位素密度比为 1/2^[7]。



1——剥离和加速系统; 2——剥离箔; 3——分析磁铁; 4——霍尔探头; 5——分析电容器; 6——探测器屏蔽层; 7——探测器阵列; A⁰——从等离子体中逸出的中性粒子; A⁺——二次离子; H——探测 H⁺ 的阵列; D——探测 D⁺ 的阵列

图 2 CNPA 示意图(a)及在 Wendelstein 7-AS 仿星器上测量的 H 和 D 中性粒子能谱(b)^[7]

Fig. 2 Schematic of CNPA (a) and H and D spectrum on Wendelstein 7-AS stellarator (b)^[7]

在 ITER 计划^[43]中, 电荷交换型 NPA 诊断系统的首要目标是监测 ITER 燃烧等离子体中氢同位素组分, 也就是监测氘氚燃料比, 为此 NPA 被列入 ITER 的优先诊断列表, 其次是测量包括聚变产物 He 离子在内的 MeV 量级快离子能谱。ITER 的 NPA 系统^[5,44-46]由俄罗斯 Ioffe 研究所研制, 由高能 NPA(HENPA)和低能 NPA(LENPA)串联组成, 如图 3 所示。它们都是串联 E//B 结构的 NPA, 原型分别为 Ioffe 研究所研制的 HENPA^[3]

和 ISEP^[4], 均采用厚度约为 100 Å 的 DLC 来剥离中性粒子。为了提高 LENPA 的探测效率, 在 LENPA 的 DLC 上增加+100 kV 的电压对剥离后的离子进行加速。LENPA 可探测能量 10~200 keV 的 H、D 和 T 中性粒子, 满足 ITER 装置氘氚燃料比监测需求。HENPA 可对剥离后的 D⁺(160~2 200 keV) 或 He²⁺(320~4 400 keV)、T⁺(110~1 450 keV) 和 He⁺(80~1 100 keV) 进行能量和质量分析, 满足 MeV 快离子能谱测量需求。

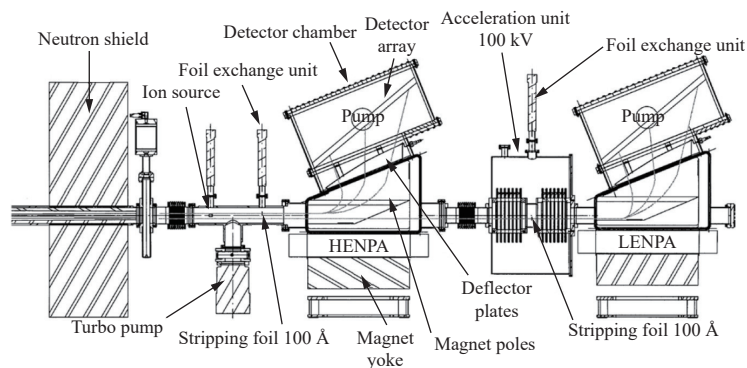


图 3 ITER 装置的两个 E//B NPA 串联系统示意图^[5]

Fig. 3 Layout of tandem of two E//B NPA in ITER^[5]

2 其他类型的 NPA

随着聚变研究的深入发展, 快离子引起的磁

流体不稳定性逐渐备受关注^[47-53]。传统的电荷交换型 NPA 功能很强大, 对单视弦上的中性粒子能

量和质量具有很高的分辨能力。但是受限于体积、分析原理和造价, 电荷交换型 NPA 很难做到多视弦测量。近 20 年来, 天然钻石探测器(NDD)^[54-55]和绝对极紫外线硅光电二极管 (AXUV-SiPM)^[56-57]发展迅速。它们都具有结构紧凑、方便使用、能量分辨高等优点, 为快离子多视弦测量提供了可能。最早是 1999 年 TFTR 装置使用了单个 NDD 来测量 D 等离子体在 ICR 加热实验中 H⁺ 的能谱和通量^[54]。紧接着大型螺旋装置 (large helical device, LHD) 上也使用了 NDD 阵列来测量快离子^[55], 在实验中, NDD 的良好性能得到了验证。之后在 2003 年, LHD 装置又发展了基于 AXUV-SiPM 阵列的 NPA (silicon detector-based NPA, SDNPA)^[56]。SDNPA 由 20 个 AXUV-SiPM 组成, 可对 65°~110° 范围内俯仰角出射的快离子进行探测。美国

PPPL 的国家球形圆环实验 (NSTX) 装置上的 ssNPA^[11-12, 14] 也采用了 AXUV-SiPM 来进行快离子探测, 可探测 4 个不同视弦上的中性粒子。之后在 NSTX 升级装置 (NSTX-U) 上安装了全新的 ssNPA 系统, 由 3 个 ssNPA 组成 (r-ssNPA、t-ssNPA 和 p-ssNPA), 3 个 ssNPA 均由 16 个 AXUV-SiPM 组成, 如图 4a 所示, 图 4b 给出 ssNPA 测量的时间分布^[16]。NSTX-U 装置的 ssNPA 系统可对快离子的空间、时间和俯仰角分布进行测量。我国的 EAST 装置也在 2014 年首次安装了基于 AXUV-SiPM 的 ssNPA 系统, 包括两个 7 通道垂直方向的 ssNPA 和 1 个 32 通道水平方向 ssNPA, 如图 5a 所示, 图 5b 给出水平方向 ssNPA 在不同中性束加热条件下测量的通量随通道的变化。这些 ssNPA 为了得到较好的时间分辨, 目前均工作在积分通量测量模式。

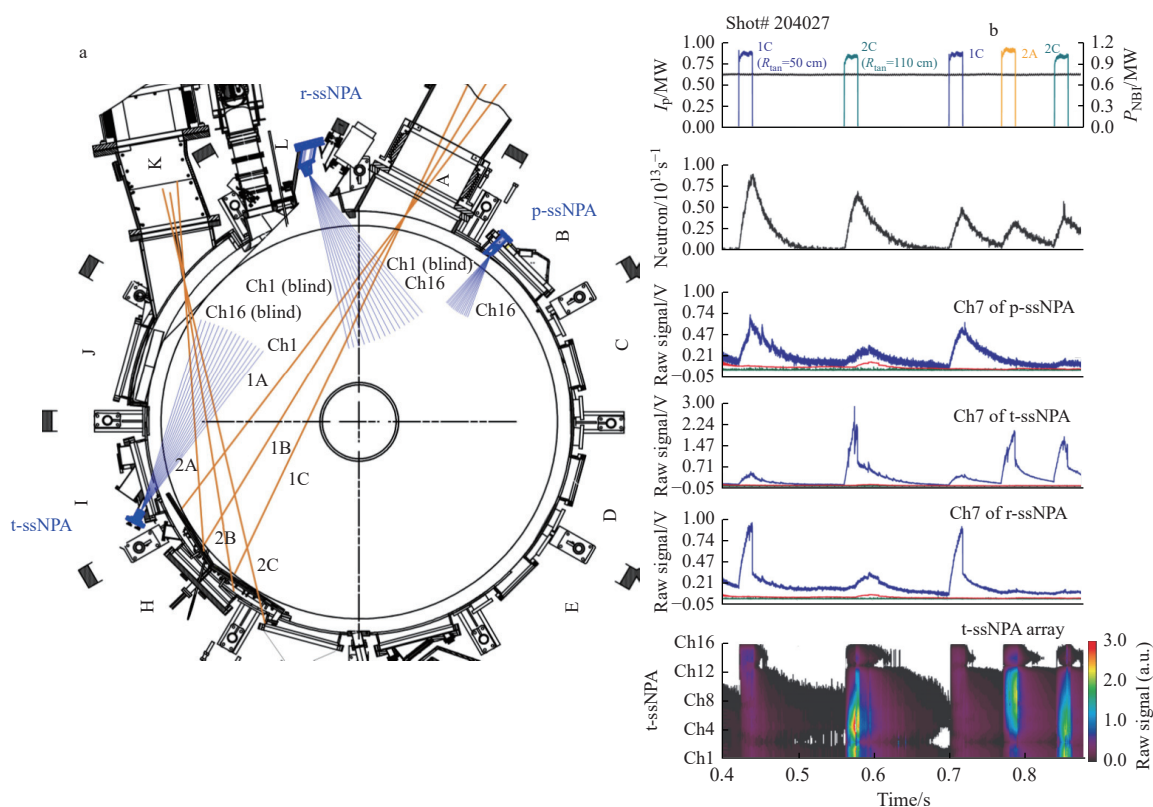


图 4 NSTX-U 装置的 ssNPA 系统示意图(a)及测量的时间分布(b)^[16]
 Fig. 4 Layout of ssNPA in NSTX-U (a) and measurement time distribution (b)^[16]

近年来, 人们又发展了一种新的成像 NPA (imaging neutral particle analyzer, INPA)^[17-19], 用来探测托卡马克等离子体中的快离子径向分布和能量分布。INPA 是利用托卡马克的边缘磁场来对被剥

离后的带电离子进行分析, 通过闪烁屏和高速相机来记录偏转后离子的位置, 进而得到快离子的能谱和径向分布。INPA 原理图如图 6a 所示, 图 6b 为 D III-D 托卡马克装置上 INPA 测量的不同时刻

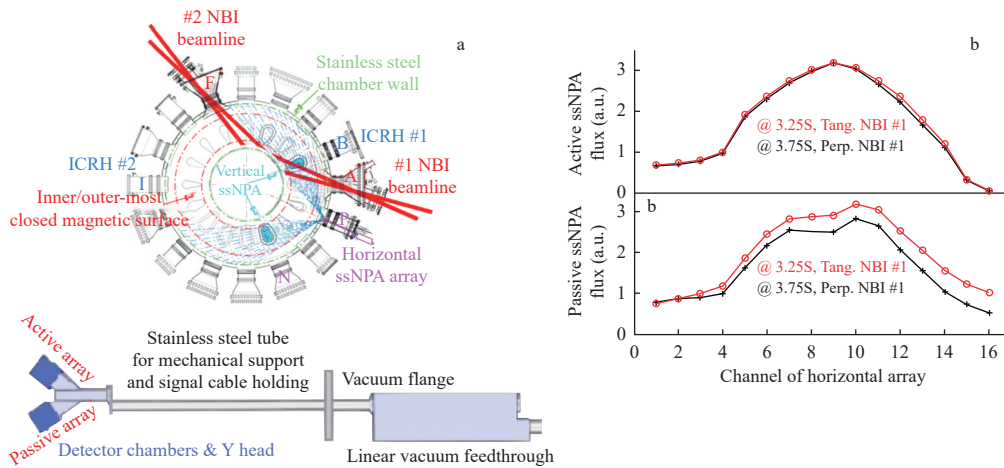


图5 EAST装置的ssNPA系统示意图(a)及水平方向ssNPA的通量随通道的变化(b)^[15]

Fig. 5 Layout of ssNPA in EAST (a) and flux of ssNPA (b)^[15]

能量、半径二维分布以及时间分布^[58]。在后续的实验,该INPA实现了快速离子速度-空间的层析成像,并给出了锯齿崩塌前后快离子径向分布的变化^[17],如图7所示。随后AUG托卡马克装置团队也研制了高相空间分辨率和快时间响应的INPA^[19],用来探测局域像空间内的快离子分布。该INPA已安装到AUG装置,目前还没有相关实验结果。国内同样在发展INPA,HL-2A装置上发展了基于硫化锌银闪烁体的INPA用于快离子与高能量不稳定性之间的相互作用研究,确定激发各种不稳定性快离子的特征。目前该INPA已取得初步研究成果,并确定了实验中长寿模(LLM)不稳定性快离子的能量、位置和螺距角等特征信息^[59]。该INPA的结构示意图和测量到的快离子能谱和位置如图8所示。此外,EAST上同样安装

有INPA用于测量高能离子的空间分布函数及中性束的沉积位置^[60]。

3 中国环流3号装置上的E//B NPA

针对HL-3装置^[42]的快离子物理研究,四川大学与核工业西南物理研究院联合研制了一套新的E//B NPA^[61-65],其结构如图9所示。该E//B NPA可同时分辨H和D的能量和质量,设计的能量范围为20~200 keV。该E//B NPA的剥离单元采用气体作为剥离介质,降低了低能量粒子在剥离介质中的散射损失。分析单元与CNPA类似,采用钕铁硼永磁体提供磁场,平行电极板提供电场。探测阵列采用32路硅酸钇耦合硅光电倍增器(LYSO+SiPM)作为探测模块。该E//B NPA的主要参数列于表1。相比国内其他NPA,该E//B

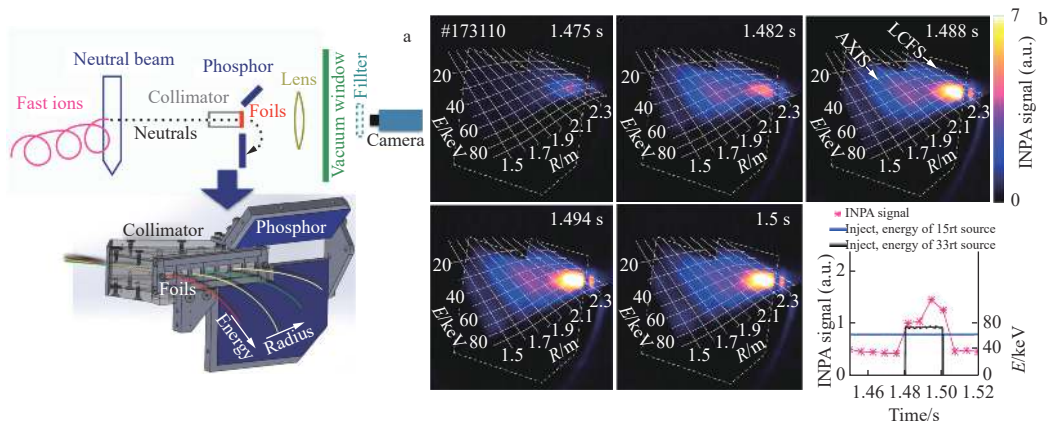


图6 INPA原理示意图(a)及测量的不同时刻能量、半径二维分布和时间分布(b)^[58]

Fig. 6 Principle of INPA (a) and two-dimensional distribution and time distribution of energy and radius measured at different time (b)^[58]

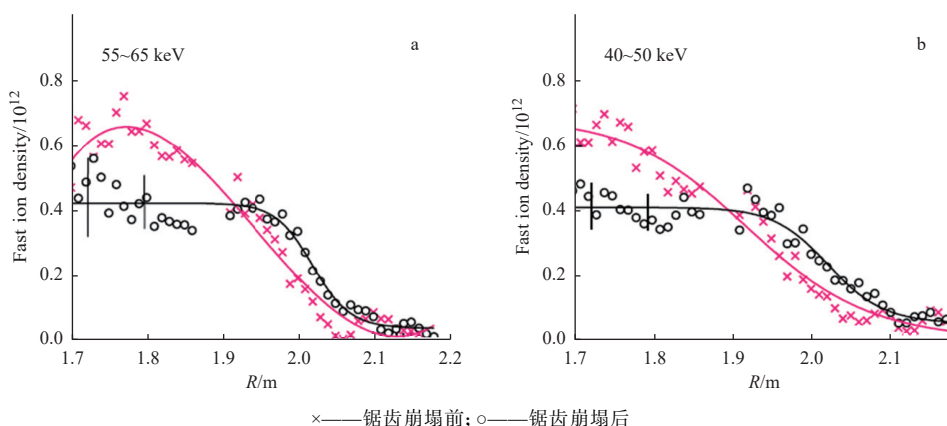


图 7 锯齿崩塌前(a)、后(b)快离子的径向分布^[17]

Fig. 7 Radial profile of fast ion density before (a) and after (b) sawtooth collapse^[17]

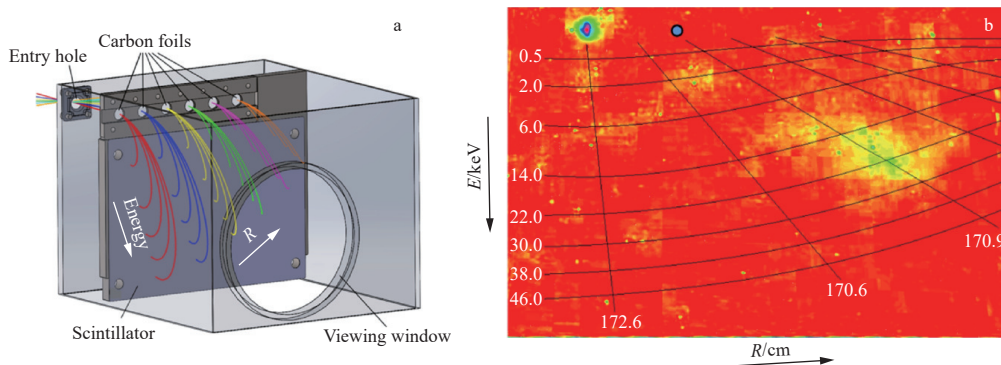
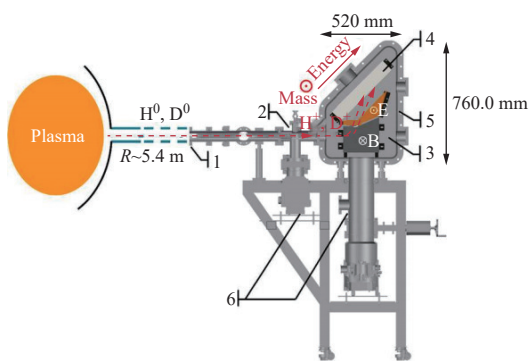


图 8 HL-2A 上 INPA 结构示意图(a)和通过闪烁体屏上轰击斑位置得到的快离子能量和位置(b)^[59]

Fig. 8 Structure of INPA on HL-2A (a) and energy and birthplace of fast ion based on impact light spot on scintillator screen (b)^[59]



1——过渡管道; 2——剥离室; 3——分析单元;
4——探测阵列; 5——分析腔室; 6——真空泵系统

图 9 HL-3 装置上的 E//B NPA 示意图

Fig. 9 Layout of E//B NPA on HL-3 device

NPA 能够进行质量分辨, 并且能量测量的范围更宽; 采用新型 LYSO+SiPM 探测器模块, 具有结构简单、对中子不灵敏、工作电压低、输出信号快、受电磁场影响小的优点, 并且对能量大于 20 keV 带电离子的探测效率接近 100%^[63]; 探测器模块尺寸小, NPA 测量中性粒子能谱的能量分辨率高

表 1 E//B NPA 的主要参数
Table 1 Main parameter of E//B NPA

参数	参数值
整体三维尺寸, mm	1 895(高)×1 326(长)×450(宽)
整体质量, kg	约 430
剥离气体	H ₂
剥离室入口气压, Pa	40
磁铁间隙磁场强度, T	0.21~0.85
磁铁材料	NdFeB
电场强度, kV/cm	5
电极板材料	无氧铜
探测器	LYSO+SiPM
探测器数量	2×16

(<10%); 扩展性强, 通过调整和改装探测器阵列, 可以让 NPA 测量其他种类的离子。

该 E//B NPA 剥离单元的气体剥离效率已在四川大学 50 kV 离子源平台上利用气体剥离的逆过程进行了实验验证, 在入射质子能量 $E_p > 20$ keV

时,实验结果与蒙特卡罗模拟结果一致^[65]。E//B NPA 的整体标定工作是在中国核动力研究设计院的 300 kV 离子加速器上进行,分别利用 H⁺和 D⁺束流对探测器的能量测量范围及分辨率(单个探测器测量到的能量区间与其平均能量的比值)进行了验证,实验结果也与 COMSOL 模拟结果相符,达到了预期的设计目标。该 E//B NPA 已于 2023 年 7 月成功安装到 HL-3 装置的 4 号窗口,并开展了一轮等离子体放电实验测量。图 10 为第 03389 炮放电实验中, E//B NPA 探测器测量到的扣除本底后的能谱。第 03389 炮 NBI 功率为 0.8 MW, NBI 期间等离子体电子密度为 $(2.5\sim 2.8)\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。由图 10 可以看到, E//B NPA 测量到了 16~40 keV 范围的 D 中性粒子,没有测量到高能量的 H 中性粒子。这是由于背景等离子体温度很低,等离子体中能量大于 20 keV 的 H⁺离子密度极低,几乎没有高能量 H 中性粒子进入到 E//B NPA。而 E//B NPA 测量到的 16~40 keV 的 D 中性粒子是 40 keV 中性束注入的慢化谱。从这一轮 HL-3 装置等离子体放电实验的测量结果,可以看出新研制的 E//B NPA 能够探测等离子体中的快离子能谱并实现质量分辨,为 HL-3 装置聚变燃烧等离子体中性粒子诊断及快离子物理研究奠定了技术基础。

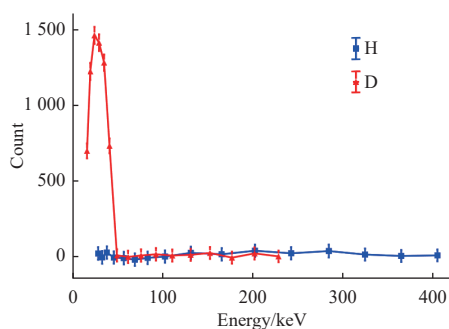


图 10 HL-3 装置第 03389 炮放电实验中 E//B NPA 测量到的中性粒子能谱

Fig. 10 Energy spectrum measured by E//B NPA in shot No. 03389 on HL-3 device

4 总结

自世界上首台 NPA 问世以来, NPA 的测量技术已实现质的飞跃,其能量范围已扩展至百 keV 到 MeV,成为托卡马克装置中不可或缺的关键诊断工具。本文按时间顺序全面回顾了 NPA 系统的研究现状,重点介绍了几种代表性的 NPA 系统,包括 CNPA、ITER 上的 HENPA 和 LENPA 串

列系统、ssNPA 及 INPA。此外,着重介绍了四川大学与核工业西南物理研究院联合研制的 E//B NPA。该 E//B NPA 已成功安装应用于 HL-3 装置,为聚变燃烧等离子体中性粒子诊断及快离子物理研究奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] AFROSIMOV V V, GLADKOVSKII I P, GORDEEV Y S, et al. Investigation of the stream of neutral atomic particles emitted by the alpha plasma[J]. *Sov Phys Tech Phys*, 1961, 5: 1389-1402.
- [2] AFROSIMOV V V, BEREZOVSKII E L, GLADKOVSKII I P, et al. Multichannel energy and mass analyzer for atomic particles[J]. *Sov Phys Tech Phys*, 1975, 20: 33-37.
- [3] KISLYAKOV A I, KHUDOLEEV A V, KOZLOVSKII S S, et al. High energy neutral particle analyzer[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1997, 34: 107-113.
- [4] AFANASYEV V I, GONDHALEKAR A, BABENKO P Y, et al. Neutral particle analyzer/isotope separator for measurement of hydrogen isotope composition of JET plasmas[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(4): 2338-2352.
- [5] AFANASYEV V I, CHERNYSHEV F V, KISLYAKOV A I, et al. Neutral particle analysis on ITER: Present status and prospects[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 621(1/2/3): 456-467.
- [6] PETROV M P, AFANASYEV V I, CHERNYSHEV F V, et al. 60 years of neutral particle analysis: From early Tokamaks to ITER[J]. *The European Physical Journal H*, 2021, 46(1): 5.
- [7] CHERNYSHEV F V, AFANASYEV V I, DECH A V, et al. A compact neutral-particle analyzer for plasma diagnostics[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2004, 47(2): 214-220.
- [8] MEDLEY S S, ROQUEMORE A L. Construction and operation of parallel electric and magnetic field spectrometers for mass/energy resolved multi-ion charge exchange diagnostics on the Tokamak fusion test reactor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(7): 2651-2662.
- [9] LI W, XIA Z W, LU J, et al. A new neutral particle analyzer diagnostic and its first commissioning on HL-2A[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D702.

- [10] QU Y F, ZANG L G, CHEN W, et al. Development and validation of the E parallel B type neutral particle analyzer on the HL-3 Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2023, 197: 114074.
- [11] SHINOHARA K, DARROW D S, ROQUEMORE A L, et al. Solid state neutral particle analyzer array on National Spherical Torus Experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3640-3642.
- [12] LIU D, HEIDBRINK W W, DARROW D S, et al. Performance of the solid state neutral particle analyzer array on the national spherical torus experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10F113.
- [13] TANG V, LIPTAC J, PARKER R R, et al. Compact multichannel neutral particle analyzer for measurement of energetic charge-exchanged neutrals in Alcator C-Mod[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(8): 083501.
- [14] ZHU Y B, BORTOLON A, HEIDBRINK W W, et al. Compact solid-state neutral particle analyzer in current mode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D304.
- [15] ZHANG J Z, ZHU Y B, ZHAO J L, et al. First results from solid state neutral particle analyzer on experimental advanced superconducting Tokamak[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D834.
- [16] LIU D, HEIDBRINK W W, TRITZ K, et al. Compact and multi-view solid state neutral particle analyzer arrays on National Spherical Torus Experiment-Upgrade[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D803.
- [17] DU X D, van ZEELAND M A, HEIDBRINK W W, et al. Resolving the fast ion distribution from imaging neutral particle analyzer measurements[J]. *Nuclear Fusion*, 2020, 60(11): 112001.
- [18] LIN D J, DU X D, HEIDBRINK W W, et al. Validation of the imaging neutral particle analyzer in nearly MHD quiescent plasmas using injected beam ions on DIII-D[J]. *Nuclear Fusion*, 2020, 60(11): 112008.
- [19] RUEDA-RUEDA J, GARCÍA-MUÑOZ M, VIEZZER E, et al. Design and simulation of an imaging neutral particle analyzer for the ASDEX upgrade Tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 043554.
- [20] GARCIA-DOMINGUEZ J, RUEDA-RUEDA J, VIEZZER E, et al. Imaging neutral particle analyzer engineering design and installation for the ASDEX upgrade Tokamak[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, 50(11): 4138-4143.
- [21] LIU D, ZHOU C, CAO Z, et al. Construction of the HL-2A Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, 66/67/68: 147-151.
- [22] WAN Y, LI J, LIU Y, et al. Overview of the present progress and activities on the CFETR[J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57(10): 102009.
- [23] WU S. An overview of the EAST project[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(5/6/7/8/9/10/11/12/13/14): 463-471.
- [24] BELL M G. Magnetic fusion energy[C]//The Tokamak Fusion Test Reactor. [S. l.]: [s. n.], 2016: 119-166.
- [25] HORTON L, BATISTONI P, BOYER H, et al. JET experiments with tritium and deuterium-tritium mixtures[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 109/110/111: 925-936.
- [26] SHIMADA M, CAMPBELL D J, MUKHOVATOV V, et al. Progress in the ITER physics basis, Chapter 1: Overview and summary[J]. *Nuclear Fusion*, 2007, 47: S1-S17.
- [27] HILL D N, TEAM T D D. DIII-D research towards resolving key issues for ITER and steady-state Tokamaks[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104001.
- [28] STROTH U, ADAMEK J, AHO-MANTILA L, et al. Overview of ASDEX upgrade results[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104003.
- [29] GREENWALD M, BADER A, BAEK S, et al. Overview of experimental results and code validation activities at Alcator C-Mod[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104004.
- [30] KWAK J G, OH Y K, YANG H L, et al. An overview of KSTAR results[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104005.
- [31] SABBAGH S A, AHN J W, ALLAIN J, et al. Overview of physics results from the conclusive operation of the National Spherical Torus Experiment[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104007.
- [32] MEYER H, ABEL I G, AKERS R J, et al. Overview of physics results from MAST towards ITER/DEMO and the MAST upgrade[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104008.
- [33] KAMADA Y, BARABASCHI P, ISHIDA S, et al. Progress of the JT-60SA project[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104010.
- [34] CODA S for the TCV Team. Overview of recent and current research on the TCV Tokamak[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104011.
- [35] BURATTI P, ALESSI E, AMICUCCI L, et al. An overview of FTU results[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104012.
- [36] COPPI B, AIROLDI A, ALBANESE R, et al. New developments, plasma physics regimes and issues for the ig-

- nitor experiment[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104013.
- [37] ZHUANG G, GENTLE K W, RAO B, et al. Recent research work on the J-TEXT Tokamak[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104014.
- [38] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展[J]. *物理*, 2016, 45(2): 88-97.
- LI Jiangang. The status and progress of Tokamak research[J]. *Physics*, 2016, 45(2): 88-97(in Chinese).
- [39] 李建刚, 赵君煜, 彭子龙. 全超导托卡马克核聚变实验装置[J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(5): 474-477, 479-480.
- LI Jiangang, ZHAO Junyu, PENG Zilong. Full superconducting Tokamak nuclear fusion experimental device[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2008, 23(5): 474-477, 479-480(in Chinese).
- [40] WAN B N, LIANG Y, GONG X Z, et al. Recent advances in EAST physics experiments in support of steady-state operation for ITER and CFETR[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(11): 112003.
- [41] SONG Y, ZOU X, GONG X, et al. Realization of thousand-second improved confinement plasma with super I-mode in Tokamak EAST[J]. *Science Advances*, 2023, 9(1): eabq5273.
- [42] HL-3 brief introduction[EB/OL]. <https://www.swip.ac.cn/swip/english66/tokamaks/1366463/index.html>.
- [43] CLAESSENS M. ITER: The giant fusion reactor: Bringing a sun to earth[M]. Cham: Springer, 2020: 11-35.
- [44] AFANASYEV V I, MIRONOV M I, NESENEVICH V G, et al. Assessment of neutral particle analysis abilities to measure the plasma hydrogen isotope composition in ITER burning scenarios[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, 55(4): 045008.
- [45] PETROV S Y, AFANASYEV V I, MELNIK A D, et al. Design features of the neutral particle diagnostic system for the ITER Tokamak[J]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2017, 80(7): 1268-1278.
- [46] MIRONOV M I, ZAITSEV F S, GORELENKOV N N, et al. Sawtooth mixing of alphas, knock-on D, and T ions, and its influence on NPA spectra in ITER plasma[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58(8): 082030.
- [47] CHEN W, WANG Z X. Energetic particles in magnetic confinement fusion plasmas[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(12): 125001.
- [48] CHEN L, ZONCA F. Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88: 015008.
- [49] SHI P W, CHEN W, DUAN X R. Energetic particle physics on the HL-2A Tokamak: A review[J]. *Chinese Physics Letters*, 2021, 38(3): 035202.
- [50] CHEN Y, ZHANG W, BAO J, et al. Verification of energetic-particle-induced geodesic acoustic mode in gyrokinetic particle simulations[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(9): 095201.
- [51] MADSEN B, HUANG J, SALEWSKI M, et al. Fast-ion velocity-space tomography using slowing-down regularization in EAST plasmas with co- and counter-current neutral beam injection[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, 62(11): 115019.
- [52] GORELENKOV N N, PINCHES S D, TOI K. Energetic particle physics in fusion research in preparation for burning plasma experiments[J]. *Nuclear Fusion*, 2014, 54(12): 125001.
- [53] DING X T, CHEN W. Review of the experiments for energetic particle physics on HL-2A[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(9): 094008.
- [54] KRASILNIKOV A V, MEDLEY S S, GORELENKOV N N, et al. Tokamak fusion test reactor charge exchange atom spectrometry using a natural diamond detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 1107-1110.
- [55] ISOBE M, SASAO M, IIDUKA S, et al. Charge exchange neutral particle analysis with natural diamond detectors on LHD heliotron[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 611-614.
- [56] LYON J F, GONCHAROV P R, MURAKAMI S, et al. Spatially resolved measurements of energetic neutral particle distributions in the large helical device[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 1873-1877.
- [57] VESHCHEV E A, OZAKI T, GONCHAROV P R, et al. Initial angle resolved measurements of fast neutrals using a multichannel linear AXUV detector system on LHD[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10F129.
- [58] DU X D, van ZEELAND M A, HEIDBRINK W W, et al. Development and verification of a novel scintillator-based, imaging neutral particle analyzer in D III-D Tokamak[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58(8): 082006.
- [59] 颜筱宇, 何小斐, 于利明, 等. HL-2A 装置上成像型中性粒子分析器的物理设计和初步实验结果[J]. *物理学报*, 2023, 72(21): 216-225.
- YAN Xiaoyu, HE Xiaofei, YU Liming, et al. Physical design and primary experimental results of imaging neutral particle analyzer on HL-2A Tokamak[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(21): 216-225(in Chinese).
- [60] EAST 成像中性粒子分析仪诊断系统[EB/OL]. <http://>

- www.ipp.ac.cn/bm/dlztzd/kxyj/zdxt/east/fs/202012/t20201210_601207.html.
- [61] ZANG L, QU Y, LUO Y, et al. Design of the stripping unit and the electromagnetic analysis unit for the E//B NPA on HL-2A/2M Tokamak[J]. *Plasma Science and Technology*, 2022, 24(6): 064002.
- [62] MA L, QU Y, LUO Y, et al. The research progress of an E//B neutral particle analyzer[J]. *Plasma Science and Technology*, 2024, 26(3): 034002.
- [63] LUO Y, MA L, XIE D, et al. Characterization of the energy response of a LYSO+SiPM detector module for E//B NPA using α and hydrogen ions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, 1061: 169110.
- [64] LUO Y, LIN W P, REN P P, et al. A simulation study of a windowless gas-stripping room in an E//B neutral particle analyzer[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32(7): 22-30.
- [65] MA L, XIE D, WANG Y, et al. Experimental study on the gas stripping chamber of an E//B neutral particle analyzer[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, in press.