



·离子束科学技术及其应用·

CRAFT 负离子源中性束注入系统 400 keV 加速器束流光学特性分析*

崔庆龙, 韦江龙, 谢亚红, 梁立振, 谢远来, 胡纯栋

(中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 负离子源中性束注入(NNBI)系统是聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)的组成部分,其目标是开展 NNBI 相关的科学与工程问题研究,为未来聚变堆 NNBI 系统的研制与运行积累经验。加速器的束流光学特性决定着最终形成束流的发散性,进而影响着束流在加速器和束线中的传输效率,这对 NNBI 系统的高功率、高能量、长脉冲运行至关重要。为此,采用 IBSimu 离子束流模拟程序对目前 CRAFT NNBI 的 400 keV 加速器电极系统的物理设计进行束流光学特性分析与评估。目前该套电极结构的设计与 ITER 负离子源类似,束发散的计算结果满足设计要求。在负离子束流密度较高时(100~300 A/m² 范围内),具有更小束发散角;引出距离(5~7 mm 范围内)和加速距离(88~110 mm 范围内)的适当增加,也呈现出束发散角下降趋势。

关键词: 中性束注入;负离子源;静电加速器;束流光学;束流发散

中图分类号: TL62⁹.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230179

Beamlet optics analysis of 400 keV accelerator for CRAFT negative ion based neutral beam injection system

Cui Qinglong, Wei Jianglong, Xie Yahong, Liang Lizhen, Xie Yuanlai, Hu Chundong

(Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The negative ion based neutral beam injection (NNBI) system is one of the testing or demonstrating systems in the frameworks of Comprehensive Research Facility of Fusion Technology (CRAFT). The object of the CRAFT NNBI system is to research the key physics and engineering issues around the NNBI, and to accumulate experience for future development and operation of the NNBI system for fusion reactor. The beamlet optics character of a negative ion accelerator determines the divergence of the formed beam, and further influences the beam transmission efficiency through the accelerator and the beamline, which is very important to the high-power, high-energy, and long-pulse operation of the NNBI system. Therefore, the ion beam simulation code IBSimu was used to analyze and estimate the physics design of the beamlet optics of the 400 keV accelerator for the CRAFT NNBI system. The IBSimu code has been successfully benchmarked and applied to many negative ion sources. The current design of the electrode aperture has a similar structure of the ITER negative ion source, the calculation results of the beamlet divergence can meet the design requirement. A higher extracted ion current density (between 100 to 300 A/m²) draws a lower beamlet divergence. When properly increasing the extraction gap (between 5 to 7 mm) or acceleration gap (between 88 to 110 mm), there is a decreasing tendency of the beamlet divergence.

Key words: neutral beam injection, negative ion source, electrostatic accelerator, beam optics, beamlet divergence

聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)是中国《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》中优先部署的大科学装置。CRAFT 将通过建设一系列中国聚变工程试验堆(CFETR)原型部件和系统,为聚变堆主机关键系

* 收稿日期:2023-06-14; 修订日期:2023-10-16

基金项目:国家重大科技基础设施项目(2018-000052-73-01-001228);国家自然科学基金项目(11975264)

联系方式:崔庆龙, qlcui@ipp.ac.cn。

通信作者:韦江龙, jlwei@ipp.ac.cn。

统研究提供粒子流、电、磁、热、力等极端实验条件。负离子源中性束注入(NNBI)系统作为未来聚变堆等离子体加热、电流驱动和等离子体控制的主要手段之一^[1],因此也是CRAFT中的一个重要组成系统。CRAFT NNBI系统的初期运行指标是获得束功率 ≥ 2 MW、束能量200~400 keV、束脉宽 ≥ 100 s的氢中性束。

CRAFT NNBI负离子源的设计充分参考了国外同类负离子源的设计与运行经验(例如, JT-60SA负离子源^[2]、LHD负离子源^[3]、ITER负离子源^[4]),其主要由等离子体发生器和加速器两大部件组成^[5]。由于CRAFT NNBI负离子源的束流面积较大(1.6 m \times 0.32 m),因此等离子体发生器需要采用4台射频激励器(射频频率1 MHz、单台最大功率100 kW)产生源等离子体。为了提高负离子的产额,将具有低逸出功的铯蒸汽注入等离子体发生器;由此,等离子体中的H⁰和H⁺能够在与第一层电极(即等离子体电极)的铯附着层的碰撞和反射过程中获得电子,从而产生目标负氢离子^[6]。CRAFT NNBI负离子源加速器采用“引出+两级加速”的结构,等离子体电极与引出电极之间的引出电场(约7 kV),将等离子体电极附近的目标负离子由电极孔引出。紧接着,引出电极与加速电极、加速电极与地电极之间的两级加速电场(2 \times 200 kV),将引出的负离子加速、并形成高能负离子束流^[7-8]。

负离子束在引出和加速的过程中,会受到引出面等离子体鞘层、电极系统的电场、束流自身空间电荷以及负离子源特有的电子偏转磁场的综合作用。这使得负离子束流在电极系统中的运动轨迹和包络,发生偏转、会聚或发散等类似几何光学的特性的现象^[9]。因此,负离子源加速器的束流光学性能十分关键,其一方面决定了整个中性束注入系统的束流传输效率,另一方面还影响着电极系统自身承受的粒子流和热流。

数值模拟已逐渐成为研究加速器束流光学特性的主要手段,它能够精准地、快速地对电极系统进行参数、几何、性能等比较研究,而实验往往只作为最后的验证手段。法国CEA-IRFM研究所的J. Pamela等人对经典的二维电子轨迹模拟程序SLAC进行了二次开发和升级,实现了对负离子束流光学的模拟计算(称为SLACCAD程序)^[10]。其模拟结果与法国CEA-IRFM、日本QST-Naka和德国IPP-Garching等多个实验室的负离子束引出实验数据具有较好的一致性。德国法兰克福大学的R. Becker在离子光学模拟程序IGUN(同样源于SLAC程序)的基础上,进一步发展了适用于负离子引出的二维模拟程序nIGUN^[11]。nIGUN程序基于负氢离子源的等离子体鞘层自治理论,能够计算电子、负氢离子和多达十多种正离子(如质子、铯离子、氢分子离子等)的空间电荷效应。最早由美国桑迪亚实验室J. E. Boers开发的电子和离子束流模拟程序PBGUNS,经过多次升级后也能够对负离子束流光学特性进行仿真,并成功应用于多个负氢离子源的实验校准与优化设计。IBSimu程序是芬兰Jyväskylä大学的T. Kalvas研发的带电粒子束流光学三维模拟程序^[12]。该程序目前也已经被用于多个负离子源的束流光学研究与设计。中国核工业西南物理研究院的王惠三等人也基于等离子体鞘层理论,独立研发了负离子束流光学模拟程序,并开展了高能负离子源加速系统的详细设计,研究了引出电子流、电子偏转磁场、剥离损失等对负离子束流光学特性的影响^[13]。

CRAFT NNBI负离子源加速器的束流光学设计与校核以IBSimu离子束流模拟程序为主。本文重点研究引出面等离子体参数和电极结构对束流光学特性的影响。

1 物理模型与基本方程

IBSimu(Ion Beam Simulator)是基于Poisson-Vlasov迭代的离子光学数值模拟程序,用于开展离子光学、等离子体(正离子、负离子或电子)引出和空间电荷主导的离子束输运等方面的仿真分析。IBSimu程序最初由美国LBNL实验室开发并用于脉冲中子源的缝形束流引出与纳秒级斩波的设计;随后在芬兰Jyväskylä大学得到进一步的模块化升级,从而能够更为灵活地应用于多种离子源的离子束流模拟研究。IBSimu程序基于C++库编写,已经获得GNU通用公共许可证并作为开源程序发布。

与时间无关的等离子体引出与加速系统(即静电系统)可以联合Poisson方程与Vlasov方程模拟仿真。Poisson方程用于描述电势与空间电荷的关系,即

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

与时间无关的Vlasov方程用于描述在电场 $\mathbf{E} = \nabla\phi$ 和恒定磁场 \mathbf{B} 中的粒子分布 $f(\mathbf{v}, \mathbf{r})$ 特性,即

$$\mathbf{v} \cdot \nabla f - \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 \quad (2)$$

Poisson方程中的空间电荷密度可写为

$$\rho = q \int f d\mathbf{v} + \rho_{pl}\phi \quad (3)$$

式中: 空间电荷密度的非线性函数 $\rho_{pl}(\phi)$ 由近似的等离子体特征模型给出。

为了能够通过数值方法求解上述三个方程, 需要将电势、电场、密度等变量在求解域内离散化、网格化。由此, 这些离散方程的解可以通过 Poisson-Vlasov 迭代过程给出(如图 1 所示)。整个迭代过程以求解 Laplacian 方程 $\nabla^2 \phi = 0$ 为起始, 即需要在几何域内合理给定的电势初始值。由求解 Laplacian 方程得到的电势解 ϕ , 可以计算出电场。然后, 基于射线追踪(Ray-tracing)方法, 利用粒子运动方程, 计算粒子在求解的电场和输入的磁场中的运动轨迹; 基于射线追踪结果, 可以计算出各个网格中的空间电荷密度 ρ_n 。再结合由等离子体特征模型得到的空间电荷密度解析解 ρ_{pl} , 即 $\rho = \rho_n + \rho_{pl}$, 可以通过求解 Poisson 方程计算出新的电势解 ϕ , 作为下一个迭代的输入值。此外, 为了增加迭代的收敛性, 在 IBSimu 程序中对射线追踪得到的空间电荷密度采用低松弛法。当达到要求的收敛度后, 迭代循环结束, 模拟数据保存, 并进行相关的束流性能诊断。

2 数值模拟结果

CRAFT NNBI 负离子源的结构如图 2 所示。其加速器的详细电极结构和电压关系如图 3 所示, 本着“先吸收、再创新”的原则, 主要以国际热核聚变实验堆(ITER) NNBI 系统的负离子源作为参考。等离子体电极(PG)和引出电极(EG)之间的引出电压(V_{ext})将负离子由等离子体中引出, 但与此同时, 电子也会伴随引出。引出电极(EG)和加速电极(AG)、加速电极和地电极(GG)之间的两段加速电压(V_{acc1} 、 V_{acc2}), 将引出的负离子通过两级加速到所需的束能量。

在引出电极和加速电极中, 分别内嵌了伴随引出电子偏转磁铁(CEDM 和 ADCM)和杂散电子偏转磁铁(SEDM), 用于将伴随引出的电子和在加速过程中产生的杂散电子(主要为剥离电子、电离电子、二次电子)及时地偏转至下游的电极, 避免电子被过分的加速。但是, 本文的主题是研究电极结构、电极电压和等离子体参数对束流特性参数的影响, 模拟分析 CRAFT NNBI 负离子源加速器的运行区间。因此, 本文的数值模拟研究并不涉及磁场。

在离子源内, 等离子体的大部分为电中性的, 即电场为零; 但是, 在靠近等离子体电极的等离子体鞘层区, 会出现电场不为零的情况(即电势梯度不为零), 并由此开始对目标粒子进行加速。等离子体鞘层的形状对形成束流的聚焦特性影响较大, 而等离子体鞘层的形状又与离子源等离子体参数密切相关。等离子体计算中涉及的输入参数包括: 等离子体电势($\phi_p=20$ V), 鞘层边缘的追踪粒子初始能量($E=5$ eV), 负离子温度($T_- = 0.5$ eV), 热正离子温度($T_+ = 1$ eV)。引出的负离子电流密度 J_H 和电子电流密度 J_e 的比例为 1:1。

2.1 等离子体参数的影响

图 4 显示了等离子体密度(或引出负离子电流密度 J_H)对等离子体鞘层形状的影响, 以及相应的负离子与电子运动轨迹。当源等离子体密度与引出电压较为匹配时(图 4(b)所示), 等离子体鞘层内凹曲度适中, 粒子运动轨迹在引出电极会聚后以近乎平行束流发射出。当源等离子体密度相对较小时, 等离子体鞘层内凹曲度较大(图 4(a))

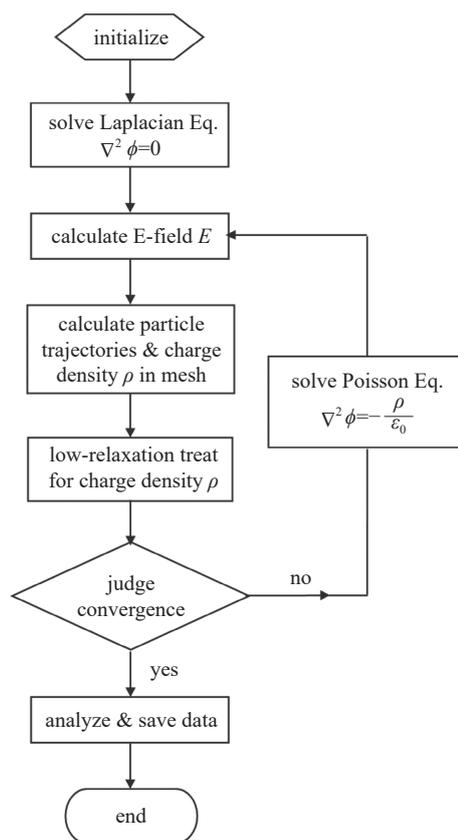


Fig. 1 Basic flow chart of the numerical simulation with IBSimu code

图 1 IBSimu 程序数值模拟的基本流程图

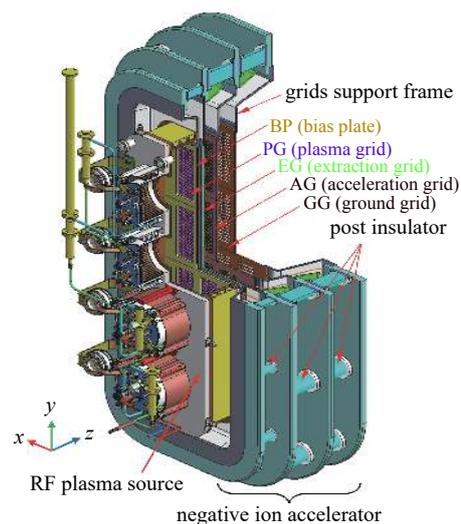


Fig. 2 Structure of negative ion source of CRAFT NNBI

图 2 CRAFT NNBI 负离子源结构图

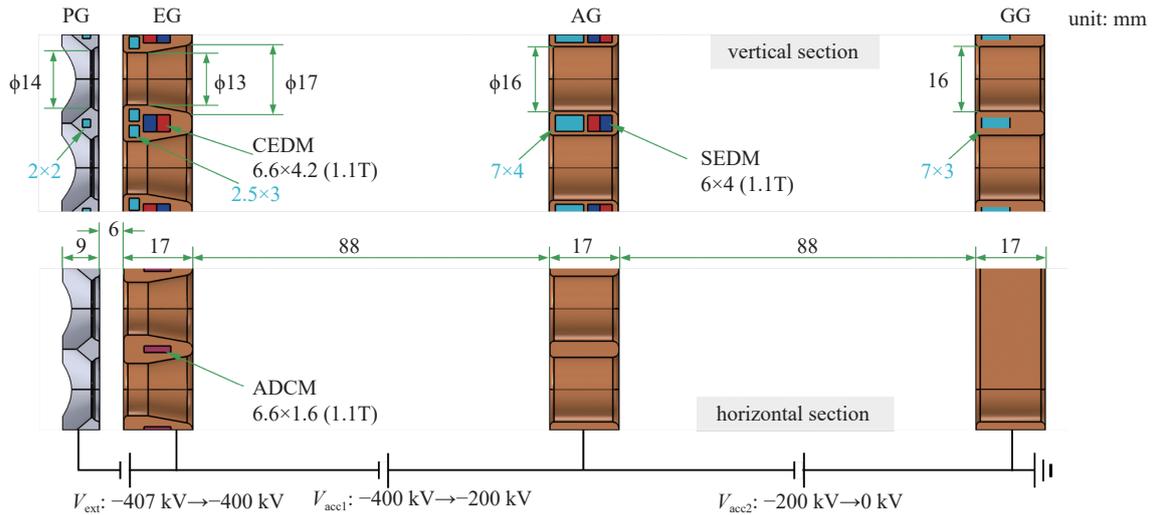


Fig. 3 Aperture structure and voltage relation of the negative ion source for CRAFT NNBI

图 3 CRAFT NNBI 负离子源电极结构与电压关系

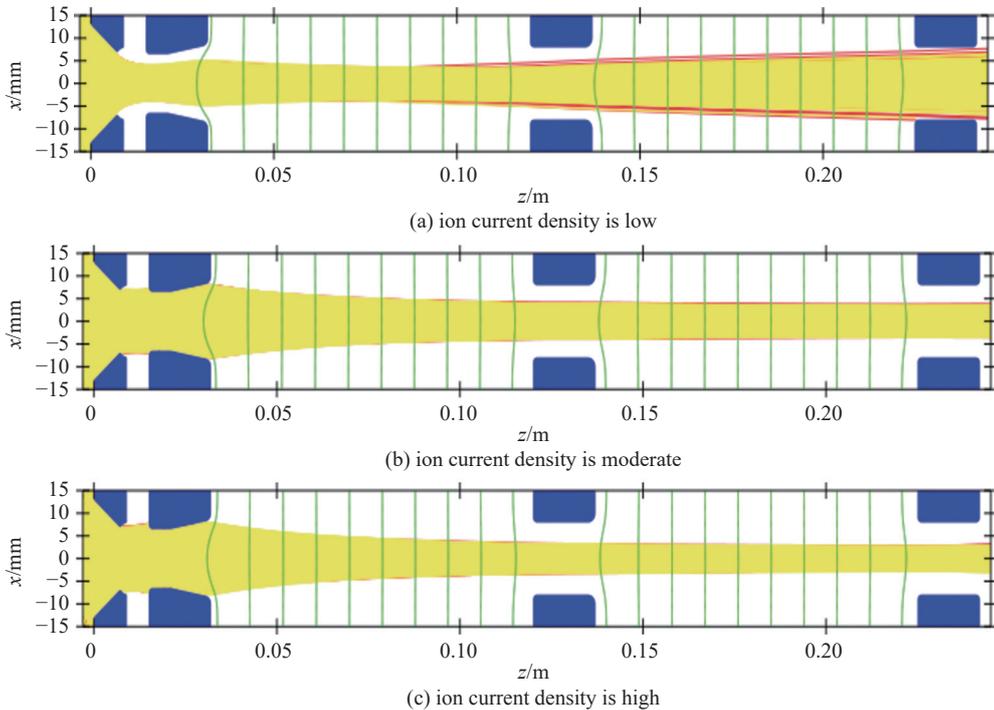


Fig. 4 Trajectories of negative ions (red line) and electrons (yellow line) during extraction and acceleration under different ion current densities

图 4 不同的离子电流密度的负离子(红色)和电子(黄色)引出与加速轨迹

所示), 粒子运动轨迹整体呈现出先会聚、后发散的“过聚焦”特性。当引出负离子电流密度相对较大时(图 4(c)所示), 等离子体鞘层内凹曲度较小甚至外凸, 粒子运动轨迹整体起始就呈现出发散的特性, 由此相当一部分束流粒子直接轰击在引出电极上。

考虑到冗余设计与优化升级的需求, CRAFT NNBI 负离子源的加速器按引出负离子电流密度为 250 A/m^2 进行物理设计。但是需要针对不同的引出电流密度匹配合适的引出电压, 以保证束流发散角合理、可控。图 5(a)显示了引出负离子电流密度分别为 100 、 150 、 200 、 250 、 300 A/m^2 时, 负离子束流在地电极出口处的均方根发散角 θ_{RMS} 随着引出电压的变化情况。由于存在较大发散角的负离子直接被电极拦截, 无法通过地电极, 使得发散角的统计存在偏差, 因此图中的数据点均为引出负离子完全通过地电极出口口的统计结果。总体上, 在不同的引出电流密度上, 随着引出电压的增加, 束流发射角均是先快速下降、然后逐渐增加。因此, 不同的引出电流密度 J_{H} 会存在最小束流散角 θ_{min} , 以及对应的最佳引出电压 V_{opt} , 如图 5(b)所示。最小束流散角随着引出电流密度的增加而单调递减, 最佳引出电压则单调递增; 该规律与 ITER 负离子源的束流光学模拟计算的结果类似^[14-15]。需要指出的

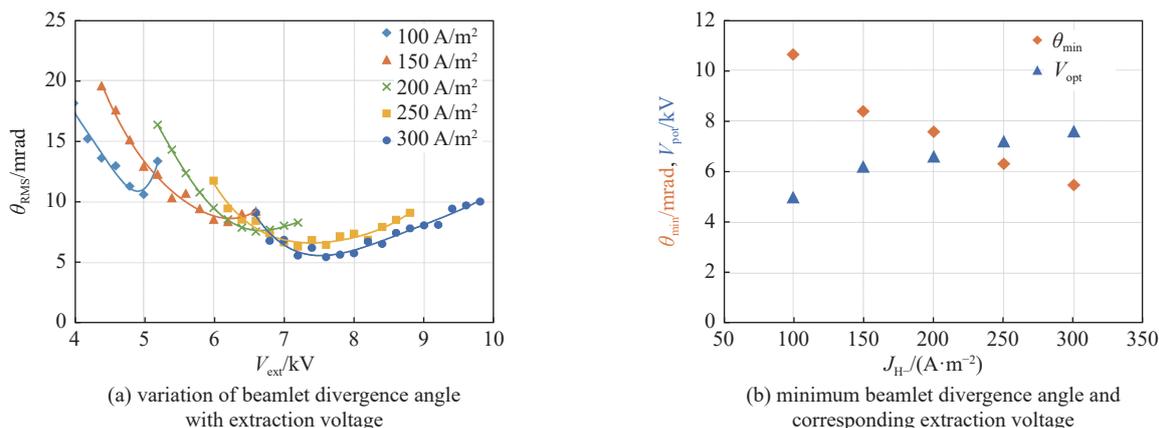


Fig. 5 Characteristics of the beamlet divergence at the GG aperture exit under different extracted current densities

图 5 不同引出电流密度下, 负离子束流在地电极出口处的发散角特性

是, 在不同的引出电压下, 引出电流密度作为输入条件保持不变, 这意味着负离子的体密度可能是不同的。

选取设计要求的引出负离子电流密度 250 A/m², 以及对应的最佳引出电压 7.2 kV, 模拟和分析不同的离子温度和不同的等离子体电势对束流发散角的影响(如图 6 所示)。离子温度相当于离子的初始热速度, 因此较高的离子温度具有较大的横向速度, 对束流散角的影响较大。如图 6(a)所示, 当离子温度设为 0 eV 时, 束流在出口处的发散角度普遍低于离子温度为 0.5 eV 的情况。根据德国 IPP^[16] 和日本 NIFS 的运行经验和实验结果^[17], 射频负离子源的等离子体电势(约 25 V)要远大于灯丝-弧负离子源(约 5 V)。模拟计算显示, 在等离子体电势为 5~30 V 范围内, 地电极出口的束流发散角随着等离子体电势的变化无明显规律; 因此, 等离子体电势对束流散角的影响较小。

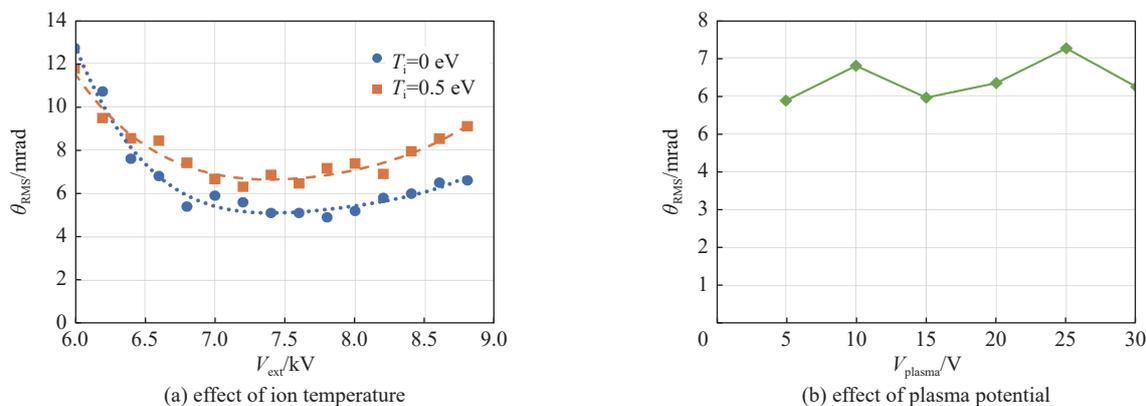


Fig. 6 Characteristics of the beamlet divergence at the GG aperture exit under different simulation conditions

图 6 不同模拟条件下, 负离子束流在地电极出口处的发散角特性

2.2 加速距离的影响

CRAFT 负离子源的单级加速 200 kV 的间距为 88 mm, 与 ITER 负离子源一致。该加速间距是根据 JT-60SA 负离子源的测试结果确定的^[18]。但由于缺少合适的测试平台, JT-60SA 负离子源仅开展了 20% 电极孔的束引出与加速实验测试(负离子束流约 2.8 A, 束脉宽约 0.9 s)。为了保证 CRAFT 负离子源的耐压性能、并具有一定的束流光学调节性能, 在工程设计中加速间距最大可以调节到 120 mm。图 7 显示了不同的加速间距对束流发散角的影响, 引出负离子电流密度同为 250 A/m²。随着加速距离的增加, θ_{min} 和 V_{opt} 均有所下降。从束流轨迹上看(如图 4 所示), 在 EG 下游, 束流由于空间电荷效应从“会聚”转为“发散”。当加速距离较小时, 这种转换位置更靠近 EG。这与束流光学理论符合, 即会聚距离 $f \propto 4V_{\text{ext}}/(E_{\text{acc}} - E_{\text{ext}})$ 。而束流过早的会聚, 使得束流在 GG 上游受到发散作用的距离增长, 可能导致发散程度增加。

2.3 引出距离的影响

由于电极的装配误差或长脉冲运行中受热变形, PG 和 EG 的引出间距可能发生变化, 为此需要模拟分析不同引出间距对束流光学特性的影响, 如图 8 所示, 引出负离子电流密度同为 250 A/m²。在保证耐压性能的前提下, 适当增加引出间距, 能够降低 θ_{min} 。同样根据束流光学理论, 在相同的 $E_{\text{acc}} - E_{\text{ext}}$ 条件下, V_{ext} 更大、会聚距离更远, 这

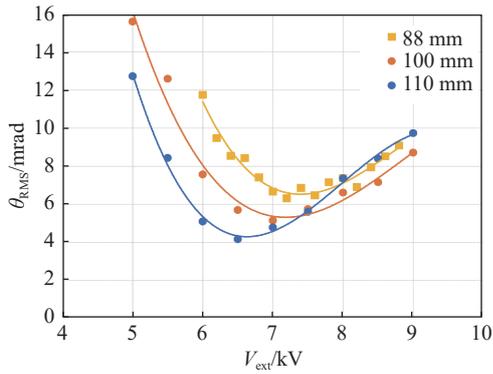


Fig. 7 Characteristics of the beamlet divergence at the GG aperture exit under different acceleration gaps

图 7 不同的加速间距下, 负离子束流在地电极出口处的发散角特性

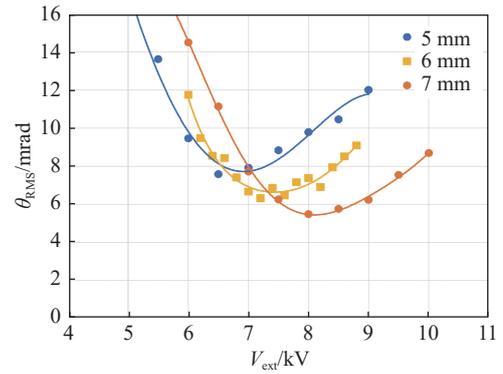


Fig. 8 Character of the beamlet divergence at the GG aperture exit under different extraction gaps

图 8 不同的引出间距下, 负离子束流在地电极出口处的发散角特性

使得 GG 上游的发散作用距离减短, 发散程度降低。

3 结 论

束流光学特性, 尤其是实现的束流密度与束流发散性, 是用于中性束注入的离子源的最关键性能指标。本文针对 CRAFT NNBI 的 400keV 负离子源的电极系统, 采用 IBSimu 离子束流模拟程序对其束流光学特性开展了详细的分析与评估。在源等离子体参数中, 负离子束流密度对束流发散的影响较为明显; 目前该套电极结构的设计与 ITER 负离子源类似, 在负离子束流密度较高时, 具有更小束发散角。离子温度由于会影响初始发射离子的横向速度, 因此对束流发散的影响也较为明显; 但等离子体电势对束流发散的影响可以忽略。

对于目前该套电极结构的设计, 当增加加速距离时, 反而具有更低的束流发散角度, 分析是束流“会聚”转为“发散”的位置更靠近上游所致, 发散的作用距离更长、发散程度更大, 能够达到的最小束发散角也更大。而增大引出间距, 则能够使束流“会聚”转为“发散”的位置更靠近下游, 因此, 其能够达到的最小束发散角也更小。

参考文献:

- [1] Takeiri Y. Negative ion source development for fusion application (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 02B114.
- [2] Kashiwagi M, Hiratsuka J, Ichikawa M, et al. 100 s negative ion accelerations for the JT-60SA negative-ion-based neutral beam injector[J]. *Nuclear Fusion*, 2022, 62: 026025.
- [3] Tsumori K, Ikeda K, Kasaki M, et al. Challenges toward improvement of deuterium-injection power in the Large Helical Device negative-ion-based NBIs[J]. *Nuclear Fusion*, 2022, 62: 056016.
- [4] Hemsworth R S, Boilson D, Blatchford P, et al. Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19: 025005.
- [5] Xie Yanghong, Hu Chundong, Wei Jianglong, et al. Conceptual design of a beam source for negative neutral beam injector of CRAFT facility[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 167: 112377.
- [6] Bacal M, Wada M. Negative hydrogen ion production mechanisms[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2: 021305.
- [7] Wei Jianglong, Hu Chundong, Xie Yahong, et al. Physics and engineering design of 400 keV H^- accelerator for negative ion based neutral beam injection system in China[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 113313.
- [8] Wei Jianglong, Yang Yuwen, Gu Yuming, et al. An integration design model for a large-scale negative ion accelerator of neutral beam injection system for fusion application[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, 30: 033102.
- [9] Brown I G. The physics and technology of ion sources[M]. 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [10] Pamela J. A model for negative ion extraction and comparison of negative ion optics calculations to experimental results[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(5): 1163-1172.
- [11] Becker R. NIGUN: A two-dimensional simulation program for the extraction of H^- ions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(5): 1723-1725.
- [12] Kalvas T, Tarvainen O, Ropponen T, et al. IBSIMU: a three-dimensional simulation software for charged particle optics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 02B703.
- [13] 王惠三, 简广德, 周才品. 高能强流负离子束系统束光学特性的数值模拟[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2000, 20(2): 93-99. (Wang Huisan, Jian Guangde, Zhou Caipin. Numerical simulation of the beam optics characteristics in a high energy and high current negative ion beam system[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2000, 20(2): 93-99)

- [14] De Esch H P L, Kashiwagi M, Taniguchi M, et al. Physics design of the HNB accelerator for ITER[J]. *Nuclear Fusion*, 2015, 55: 096001.
- [15] Agostinetti P, Aprile D, Antoni V, et al. Detailed design optimization of the MITICA negative ion accelerator in view of the ITER NBI[J]. *Nuclear Fusion*, 2016, 56: 016015.
- [16] Wimmer C, Schiesko L, Fantz U. Investigation of the boundary layer during the transition from volume to surface dominated H⁻ production at the BATMAN test facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 02B310.
- [17] Kisaki M, Tsumori K, Ikeda K, et al. Characteristics of plasma grid bias in large-scaled negative ion source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 02B131.
- [18] Kojima A, Hanada M, Tanaka Y, et al. Achievement of 500 keV negative ion beam acceleration on JT-60U negative-ion-based neutral beam injector[J]. *Nuclear Fusion*, 2011, 51: 083049.

· 简讯 ·

《强激光与粒子束》首次入选“中国精品科技期刊”

2023年9月20日,由中国科学技术信息研究所主办的“2023年中国科技论文统计结果发布会”暨中国一流科技论文世界影响力评价论坛在北京召开,发布了《中国科技期刊引证报告(核心版)》和第6届中国精品科技期刊评选结果。结果显示,《强激光与粒子束》自2018年以来已连续5次入选“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊)。同时,根据中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价结果显示,《强激光与粒子束》入选“第6届中国精品科技期刊”,即“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

中国精品科技期刊评选活动自2008年开始,每三年进行一次,根据期刊整体质量和单篇论文质量进行综合评价,所得结果客观公正,在行业内具有较强的权威性。第6届中国精品科技期刊名单包括300种以中文出版的中国精品科技期刊和27种以英文出版的中国国际化精品科技期刊。

《强激光与粒子束》首次入选“中国精品科技期刊”,表明我刊学术建设取得了长效发展,并将继续加强期刊质量保障体系建设,进一步提升学术影响力和国际影响力,为一流期刊建设贡献更大力量。当然这离不开我刊主编、执行主编、副主编、编委们的引领、强激光与粒子束领域技术专家们的厚爱,广大作者和读者的支持。在此,由衷地向各位领导、专家、作者、审稿人和读者朋友表示感谢!



《强激光与粒子束》编辑部
2023年11月