

HL-3 装置 7 MW 中性束传输效率研究

杨宪福 魏会领 万银祥 周博文 余珮炫 罗怀宇 周红霞 唐珮钦
耿少飞

(核工业西南物理研究院 成都 610225)

摘要 中性束注入加热是磁约束聚变实验中非常有效的辅助加热方法,已建成的 5 MW 中性束在中国环流三号 (HL-3) 托卡马克 1 MA 等离子体电流高约束模式放电中起到了重要的作用。为了实现 HL-3 装置 2.5 MA 的 H 模放电,计划建造 3 条中性束注入加热系统,总加热功率达到 20 MW。为 HL-3 设计了 7 MW 中性束注入器,从中性化效率和束功率沉积两方面研究束传输效率。基于蒙特卡罗方法分析了两种束流参数下中性化器性能,给出了最佳中性化效率所需的气体靶厚,并以功率沉积的方法分析了两种束流的传输性能。结果表明:当中性化送气分别为 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,束流达到最佳中性化效率;当束散角为 1.2° 时,两种束流参数得到的中性束功率分别为 7.2 MW 和 6.8 MW,束传输效率分别为 0.4 和 0.35。因此,7 MW 中性束离子源参数将优选 100 kV/45 A,但注入器仍保留了提供 120 keV 氖束的能力。

关键词 中性束, 传输效率, 中性化效率, 束散角, 功率密度

中图分类号 TL62

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050011

Study on transmission efficiency of 7 MW neutral beam injector for HL-3 tokamak

YANG Xianfu WEI Huiling WAN Yinxiang ZHOU Bowen YU Peixuan LUO Huaiyu
ZHOU Hongxia TANG Peiqin GENG Shaofei

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

Abstract [Background] Neutral beam injection heating is a very effective auxiliary heating method in magnetic confinement fusion experiment. The built 5 MW neutral beam injection plays an important role in the H-mode operation with 1 MA plasma current of HL-3 tokamak. In order to achieve the H-mode operation with 2.5 MA, three neutral beam injection heating systems will be constructed with a total heating power of 20 MW. [Purpose] This study aims to investigate the transmission efficiency of 7 MW neutral beam injector designed for HL-3 tokamak. [Methods] The beam transmission efficiency was studied from two aspects of neutralization efficiency and power deposition. The initial target thickness of the neutralizer under two beam parameters was analyzed based on Monte Carlo method. The optimal neutralization efficiency was achieved by adding neutralizer gas supply, and the target thickness required for the optimal neutralization efficiency was given. Finally, power deposition method was employed to analyze the transmission performance of the two neutral beams with different parameters at different beam divergence angles. [Results] The results show that the optimal neutralizer efficiency is achieved when the neutralizer gas supply is $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The neutral beam power obtained under two beam parameters with a divergence angle of 1.2° is 7.2 MW and 6.8 MW, respectively, and the corresponding

西物创新行动——7 MW 中性束注入器关键技术研究(No.202201XWCX001)资助

第一作者: 杨宪福, 男, 1981 年出生, 2012 年于核工业西南物理研究院获硕士学位, 高级工程师, 从事磁约束聚变中性束注入加热研究,

E-mail: yangxf@swip.ac.cn

收稿日期: 2024-04-19, 修回日期: 2024-05-06

Supported by Innovation Program of SWIP—Study on Key Technology of 7 MW Neutral Beam Injector (No.202201XWCX001)

First author: YANG Xianfu, male, born in 1981, graduated from Southwestern Institute of Physics with a master degree in 2012, senior engineer, focusing on neutral beam injection heating technology for magnetic confinement fusion, E-mail: yangxf@swip.ac.cn

Received date: 2024-04-19, revised date: 2024-05-06

transmission efficiency is 0.4 and 0.35, respectively. **[Conclusions]** The new neutral beam injector of HL-3 tokamak will be built according to the design of this study, with optimized parameter of 100 kV/45 A, while still retaining the ability to deliver a 120 keV deuterium beam.

Key words Neutral beam injection, Transmission efficiency, Neutralization efficiency, Divergence angle, Power density

中国环流三号(HL-3,原中国环流器 2M(HL-2M))目前已实现 1 MA 的高约束模式(H 模)放电^[1],中性束加热在其中起到关键的作用。下一步要实现 2.5 MA 等离子体电流 H 模的目标,要求中性束的加热功率达到 20 MW^[2]。中国环流三号有 3 个大小相同的中性束注入窗口,因此 3 条束线的加热功率须达到 7 MW。目前中国环流三号装置已建成了一条 5 MW 中性束注入器^[3-4],将再建设两条 7 MW 的束线,并将已建成的 5 MW 中性束升级到 7 MW。

影响中性束注入功率的是离子束功率和束流传输效率^[5-6]。提升束流能量以实现离子束功率的提升,却会导致束传输效率之一的中性化效率^[7]降低,因此要提升注入功率,要兼顾二者的平衡。为尽可能提高注入功率,7 MW 束线将采用与德国 W7-X 装

置中性束注入器^[8]相似的 4 组离子源。参照 HL-2A 托卡马克(中国环流 2 号 A)中性束传输效率标定的方法^[9],基于 4 个正离子源的注入器注入效率约为 0.4,7 MW 中性束注入器束流参数可以选择 100 kV/45 A 或者 120 kV/40 A。本文将分析中性化效率和束功率沉积对束传输效率的影响,为注入器参数选择提供理论支撑。

1 中性化效率

由于 HL-3 装置 3 个中性束注入窗口是一样大小,后两套注入器部件结构和第一条注入器类似,主要由 4 个正离子源、4 个独立的中性化器、偏转磁铁、量热靶、真空室、低温泵、离子吞噬器和漂移管道等部件组成,如图 1 所示。

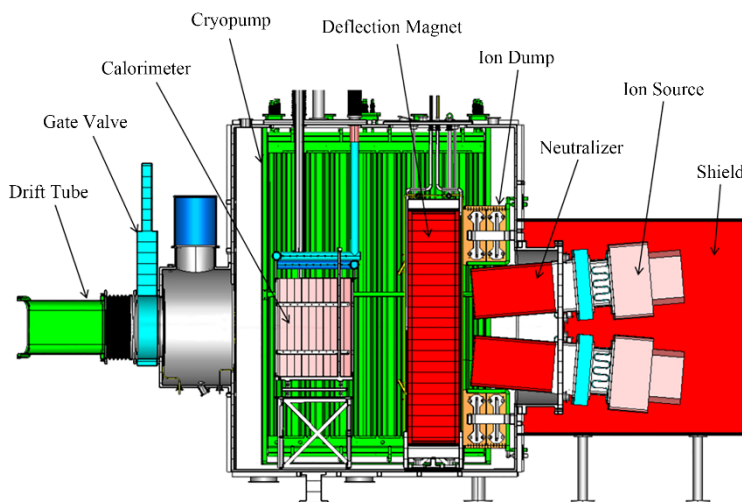


图 1 HL-3 中性束注入器剖面图
Fig.1 Sectional view of HL-3 neutral beam injector

1.1 中性化器结构

HL-3 装置中性束采用气体靶中性化器^[10-11],高能离子流通过中性化器时与气体靶碰撞反应转化为高能中性束流。气体靶由两部分形成:第一部分是离子源^[12]放电室未电离的气体在差分抽气系统的作用下,作为顺流气体通过电极孔流入中性化器,形成初始气体靶;第二部分是当初始气体靶不能实现束流的最佳中性化效率时,则需要在中性化器添加中性化送气,使气体靶达到最佳气体靶厚,从而使束流

实现最佳中性化效率。为了充分利用离子源的顺流气体,增大初始气体靶厚,将中性化器设计为 4 个独立的单元,分别与每一个离子源对应,前端直接与离子源引出端相连,其结构为截面 0.46 m×0.18 m 的矩形长管,长度为 1.8 m,材料为无氧铜。在中性化器中还存在带电离子,为防止托卡马克杂散磁场对高能离子束流的影响,在中性化器外设置一层 0.02 m 的纯铁屏蔽罩,如图 2 所示。

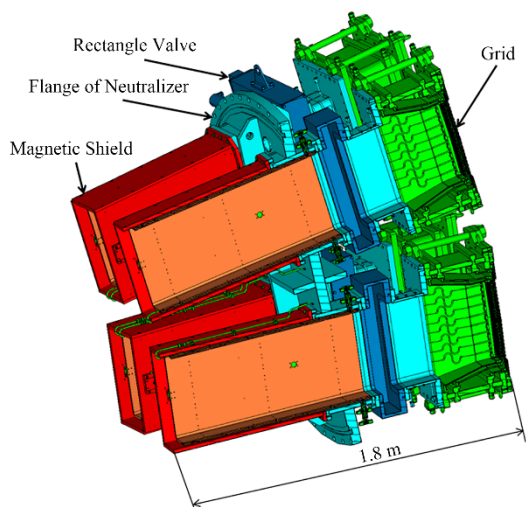


图2 HL-3中性化器结构示意图

Fig.2 Structural diagram of neutralizer of HL-3 neutral beam injector

1.2 中性化效率

利用阿伏伽德罗常数可得到引出束流所对应的气体量,对于正离子源而言,气体利用率通常为0.4,引出束成分的比例为7:2:1,因此每个中性化器中形成初始气体靶的气体量为 $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (100 kV/45 A) 和 $1.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (120 kV/40 A)。在中性束注入器低温泵^[13-14]高抽速作用下,这些气体在中性化器形成一个线性的气体密度分布,即初始气体靶。采用蒙特卡罗方法^[15]模拟中性化器中气体分子分布得到初始气体靶的气体线密度,在长度上的积分即为气体靶厚,模拟结果显示,初始气体靶厚分别是 $5.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 和 $5.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$,此气体靶可实现的中性化效率为53.5%和43.1%,都没有达到它们的最佳中性化效率。

为提高注入功率,须实现束流的最佳中性化效率,需要在中性化器添加中性化送气^[16]以增大气体靶厚。在距中性化器入口端700 mm处设置中性化送气口,采用基于直接蒙特卡罗方法(Direct Simulation Monte Carlo, DSMC)的DS2V软件模拟计算,当中性化送气为 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,叠加后的气体靶厚分别为 $8.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 和 $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$,如图3所示,使得两种能量的束流分别实现最佳中性化效率。两种参数束流中性化相关数据列于表1。

添加中性化送气后,中性化器前端的气压从0.2 Pa增加到0.36 Pa,会增加一些剥离损失,但并不会对离子源的工作造成特别大的影响。

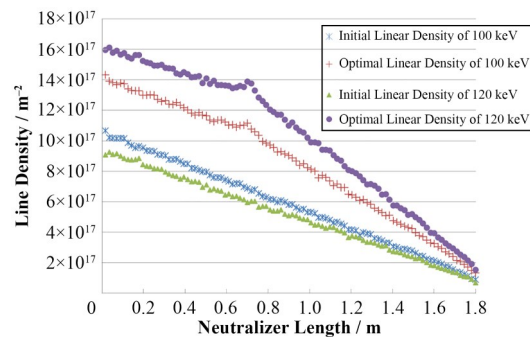


图3 两种束流的中性化器气体线密度分布

Fig.3 Linear density distribution of two kinds of neutralizer beams

表1 中性化器性能
Table 1 Neutralizer performance

	100 kV	120 kV
离子顺流气体量 Ion source flow / $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.1	1.0
初始气体靶厚 Initial target thickness / m^{-2}	5.7×10^{19}	5.1×10^{19}
初始中性化效率 Initial neutralization efficiency / %	53.5	43.1
中性化送气量 Neutralizer flow / $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.6	1.1
中性化送气的靶厚 Target thickness form by neutralizer flow / m^{-2}	2.7×10^{19}	4.9×10^{19}
最佳气体靶厚 Optimal target thickness / m^{-2}	8.4×10^{19}	1.0×10^{20}
最佳中性化效率 Optimal neutralization efficiency / %	57.8	50.5

2 束功率沉积

由于电极的特性和离子束的空间电荷效应,束流会存在一定的发散角^[17],而中性束的注入窗口是有限的,所以束流边缘的功率是无法注入到等离子体中进行加热的,束功率会在传输过程中沉积到各个部件上。通过分析束流功率沉积到各部件上的功率即可得到束流的传输性能。

根据前章所述的最佳中性化效率,两种参数中性束在不同束散角时注入功率如图4所示。基于孔引出电极的正离子源而言,束散角的正常水平是在 $0.9^\circ \sim 1.1^\circ$ 之间。当束散角 1.2° 时,100 kV/45 A束流的注入功率大于7 MW,120 kV/40 A束流的为6.8 MW,它们的总功率都大于20 MW,满足总体目标,下面按此角度分析束传输性能。

2.1 中性化器的功率沉积

4个独立中性化器的优点是气体线密度高,但

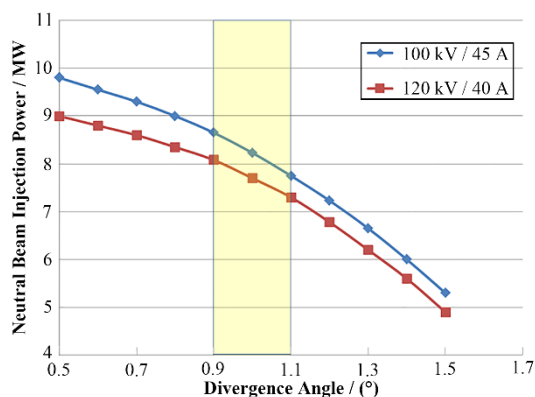


图4 注入功率与束散角关系曲线

Fig.4 The relationship curves between the injection power and the beam divergence angle

其缺点会导致更多的功率沉积在中性化器上。中性化器采用 10 mm 厚的无氧铜制成,在外侧布置蛇形冷却水管,水压 0.6 MPa。图 5 为两种参数束流在中性化器出口的功率密度分布情况。此时 4 条束流没有汇聚,两种束流在中性化器出口的总功率分别为 16.4 MW 和 17.7 MW。此时因为束流包含的是中性束和离子束功率,因此 120 kV/40 A 的束流功率要略高。两种束流的中心极值分别为 $127 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $135 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.2 刮削器的功率沉积

随着束流继续向前传输,经过偏转磁铁时,带电离子会被偏转到离子吞噬器上,束流变成中性束流,但仍会存在之前的发散角。

当注入加热时,量热靶会移开,因此不会有束功率的沉积,直到束传输到刮削器。刮削器是一个双

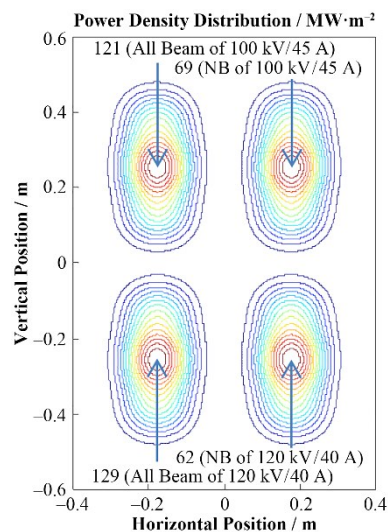


图5 中性化器出口的功率密度分布

Fig.5 Power density distribution at the neutralizer outlet

“8”字形的通道,主要作用是刮削边缘束流,避免过多的束流沉积到漂移管道。虽然刮削器仅刮削束流边缘功率,但为了避免温升过高,在“8”字形通道的四周布置内径 8 mm 的铜管,通 0.6 MPa 的冷却水以带走沉积的束功率。此时 4 条束流开始汇聚,但仅仅是束流的边缘,因此束功率的极值仍是 4 条束流各自的中心,而且随着束流的向前传输,此处的极值比在量热靶处的极值略小,分别为 $65 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $58 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,束边缘功率密度为 $11 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,远小于无氧铜 $25 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ [18] 的安全限值,如图 6 所示。对于正离子束而言,束能量越高,最佳中性化效率越低,在刮削器处,100 kV/45 A 束流功率为 8.2 MW,要略高于 120 kV/40 A 的 7.8 MW。

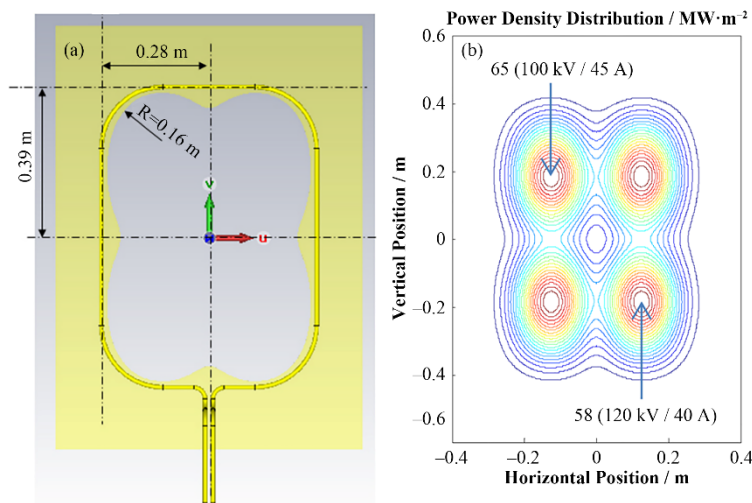


图6 刮削器结构(a)和功率密度分布(b)示意图

Fig.6 Diagrams of scraper structure (a) and power density distribution at scraper (b)

2.3 再电离损失

由于后续传输路径并非绝对真空,在偏转磁铁后,中性束流在传输过程会和气体分子再次发生碰撞反应,碰撞反应转化过程和束流在中性化器中一样。碰撞反应会导致部分中性束流再次变成离子束,这些离子束在进入等离子体前会在托卡马克磁场的作用下,偏转并损失在漂移管道上。

我们知道从中性化器出来的束流并不是单一成分,而是包含了 $D^0(E)$, $D^0(\frac{E}{2})$, $D^0(\frac{E}{3})$, $D_2^0(E)$ 和 $D_2^0(\frac{2E}{3})$ 的混合束流,要得到束流的再电离损失,需

要叠加这5种不同能量束的再电离损失。计算再电离损失的气靶厚度是漂移管道气体线密度在其长度上的积分,由于后续无气体源,漂移管道气压为均匀分布,其大小根据真空室气体负载和低温泵抽速之比得出。由于反应截面的原因,100 kV束流得到的中性化效率要高于120 kV的束流,且所需的最佳气体靶厚也小于后者。并且后者在得到最佳气体靶厚时,中性化送气就越多,导致真空负载就越大,因此120 kV束流的再电离损失也高于前者。各成分束流的占比以及再电离损失比例详见表2。

表2 中性束成分比和再电离损失占比
Table 2 Components ratio and reionization loss ratio

	100 kV/45 A			120 kV/40 A		
	单一成分占比 Fraction of component / %	单一成分再电离损失 Reionization of component / %	占比 Ratio / %	单一成分占比 Fraction of component / %	单一成分再电离损失 Reionization of component / %	占比 Ratio / %
$D^0(E)$	59.4	4.9	2.9	55.9	5.4	3.0
$D^0(\frac{E}{2})$	25.5	4.6	1.2	27.6	5.1	1.4
$D^0(\frac{E}{3})$	12.8	3.5	0.4	14.9	4.5	0.7
$D_2^0(E)$	0.5	4.6	0.02	0.3	4.0	0.01
$D_2^0(\frac{2E}{3})$	1.8	6.8	0.1	1.3	6.5	0.08
共计 Total			4.6			5.2

2.4 漂移管道的功率沉积

注入器漂移管道主要由中性束注入窗口过渡段,闸板阀,波纹管以及连接法兰组成。考虑注入器与HL-3主机的对中调整,以及装置主机真空烘烤期间,主机热膨胀对注入器的影响,设计了与注入器相连接的波纹管。考虑束功率的沉积,在波纹管内侧设计了水冷组件,在窗口过渡段外设置蛇形冷却水管。

4条束流先水平汇聚,汇聚点为6 150 mm,在漂移管道内,而后垂直汇聚,汇聚点为6 283 mm,正好在注入窗口,使得注入到等离子体的功率密度最大,同时获得最大的注入功率。在注入窗口,束流已完全汇聚成整体束,束流中心的功率密度大于单条束的功率密度,其中心功率密度分别为129 $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和121 $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$,如图7所示,此时束功率分别达到7.2 MW和6.8 MW。

由于只有高能中性粒子才能注入到托卡马克中,离子源引出的高能离子需要转化为高能的中性粒子,这一过程由高能离子与本底气体碰撞反应截面决定了不能实现完全的中性化,因此束流会损失

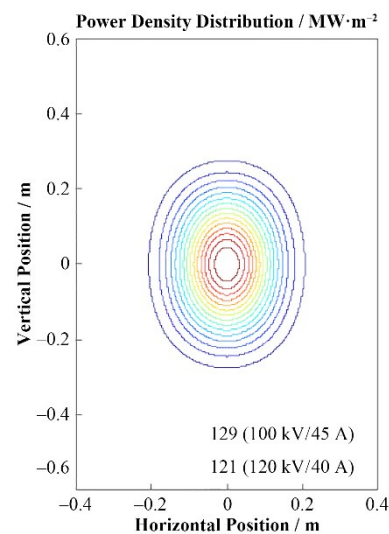


图7 注入窗口的功率密度分布
Fig.7 Power density distribution at the injection port

掉部分功率。其次由于空间电荷效应和加速电极特性,引出束流存在束散角,导致束流在传输过程中会不断沉积而损失掉部分束功率。图8显示了100 kV/45 A和120 kV/40 A束流在束散角 1.2° 时传

输过程中的束功率沉积。前者的传输效率为0.4,后者的为0.35,前者包含加热效果最好的全能量质子

束为4.1 MW,后者包含的全能量质子束为3.6 MW。

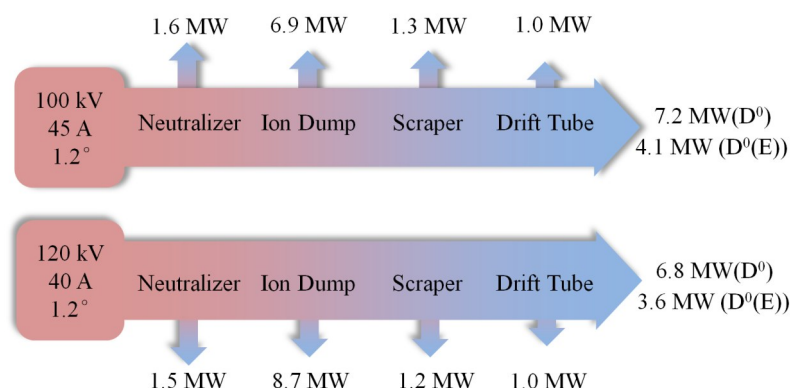


图8 100 kV/45 A 和 120 kV/40 A 束流在 1.2° 时的传输性能
Fig.8 Transmission performances of 100 kV/45 A and 120 kV/40 A beams with divergence angle 1.2°

3 总结

为实现 HL-3 装置 2.5 MA 等离子体电流 H 模放电的目标,需要再建设两条功率为 7 MW 的中性束注入器,并将现已建成的第一条束线提升到 7 MW,实现总加热功率 20 MW。设计了一条基于 4 组离子源的中性束注入器,它的离子源参数可以选择 100 kV/45 A 或 120 kV/40 A。首先分析了注入器主要部件在这两种束流参数下的性能,根据束流能量和初始靶厚,采用基于蒙特卡罗方法计算出最佳中性化效率所需的中性化气体分别为 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;注入器低温泵提供的高抽速可将再电离损失分别控制在 4.6% 和 5.2%。其次分析两种参数束流在传输过程中的功率沉积,结果表明束散角为 1.2° 时,中性束功率分别为 7.2 MW 和 6.8 MW,即不大于该束散角就能满足束功率的目标。由于 100 kV/45 A 束流的中性化效率明显高于 120 kV/40 A 的束流,前者初始束功率低于后者,但得到的注入功率要高于后者,并且其中全能量的质子束占比也要高。综上所述,HL-3 装置 7 MW 中性束离子源参数将优选 100 kV/45 A,但注入器仍保留了提供 120 keV 氖束的能力。

致谢 在此对中性束组曹建勇老师表达真挚的怀念。曹老师将毕生的热情和精力投入到了中性束研究中,带领包括作者在内的中性束团队,自主设计并建造了 HL-3 装置的第一条中性束注入器,培养了一个开拓进取、勇于创新的中性束团队。

作者贡献声明 杨宪福负责研究的提出与论文撰写;魏会领负责束功率沉积计算程序的调试与结果

评价;万银祥和周博文负责模型与图片处理;余珮炫负责计算程序的调试与优化;罗怀宇负责数据处理与结果评价;周红霞负责水流量与热工数据处理;唐珮钦负责文献资料的收集;耿少飞为项目负责人,负责论文的审阅与指导。

参考文献

- 1 Zhong W L. China's HL-3 tokamak achieves H-mode operation with 1 MA plasma current[J]. The Innovation, 2024, 5(1): 100555. DOI: 10.1016/j.xinn.2023.100555.
- 2 曹建勇,魏会领,耿少飞,等. HL-2M 装置 NBI 加热系统规划及束线研究进展[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(A2): 489 - 494. DOI: 10.16568/j. 0254-6086.2021s2011.
CAO Jianyong, WEI Huiling, GENG Shaofei, *et al.* Plan and research progress on the NBI heating system of HL-2M tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(A2): 489 - 494. DOI: 10.16568/j. 0254-6086.2021s2011.
- 3 Cao J Y, Wei H L, Zou G Q, *et al.* Conceptual design of 5 MW-NBI injector for HL-2M tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(6 - 8): 872 - 877. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.03.034.
- 4 Liu H, Cao J Y, Wei H L, *et al.* The latest progress of the 1st NBI beamline on HL-2M Tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 123: 448 - 452. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.02.109.
- 5 Ciric D, Challis C D, de Esch H P L, *et al.* Beam properties of the enhanced JET PINIs[M]//Fusion

- Technology 1996. Amsterdam: Elsevier, 1997: 661 – 664. DOI: 10.1016/b978-0-444-82762-3.50135-x.
- 6 胡纯栋, 梁立振, 谢远来, 等. CFETR 中性束注入系统概念设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, **42**(4): 388 – 392. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202204005.
HU Chundong, LIANG Lizhen, XIE Yuanlai, *et al.* Conceptual design of neutral beam injection system for CFETR[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2022, **42**(4): 388 – 392. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202204005.
 - 7 Porton M, Surrey E. Efficiency of neutral beam neutralizers in JET and ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, **86**: 797 – 800. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.11.019.
 - 8 McNeely P, Akaslompolo S, Auerweck W, *et al.* Commissioning and initial operation of the W7-X neutral beam injection heating system[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **161**: 111997. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111997.
 - 9 Cao J Y, Wei H L, Liu H, *et al.* Empirical scaling laws of neutral beam injection power in HL-2A tokamak[J]. Chinese Physics Letters, 2015, **32**(5): 052902. DOI: 10.1088/0256-307x/32/5/052902.
 - 10 Kim J, Haselton H H. Analysis of particle species evolution in neutral beam injection lines[J]. Journal Applied Physics, 1979, **50**: 3802 – 3807. DOI: 10.1063/1.326504.
 - 11 Berkner K H, Pyle R V, Stearns J W. Intense, mixed-energy hydrogen beams for CTR injection[J]. Nuclear Fusion, 1975, **15**: 249 – 254. DOI: 10.1088/0029-5515/15/2/009.
 - 12 谢亚红, 刘胜, 蒋才超, 等. 兆瓦级强流离子源长脉冲运行分析及实验研究[J]. 核技术, 2022, **45**(7): 070201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070201.
 - XIE Yahong, LIU Sheng, JIANG Caichao, *et al.* Analysis and experimental results of high power ion source with megawatts power for long pulse operation[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(7): 070201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070201.
 - 13 Yang X F, Cao J Y, Liu H, *et al.* Cryopump development of the 5 MW neutral beam injector system on HL-2M tokamak[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, **88**(7): 073510. DOI: 10.1063/1.4994100.
 - 14 Dremel M, Day C, Hanke S, *et al.* Cryopump design development for the ITER Neutral Beam Injectors[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, **84**: 689 – 693. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.01.004.
 - 15 Wei J L, Hu C D, Liang L Z, *et al.* Modeling the gas flow in the neutralizer of ITER neutral beam injector using Direct Simulation Monte Carlo approach[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, **88**(1): 46 – 50.
 - 16 Hanke S, Hauer V, Day C, *et al.* Experimental characterization of the gas injection nozzle for the ITER Neutral Beam Test Facility neutralizer[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, **123**: 276 – 280. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.058.
 - 17 Liu H, Cao J Y, Jiang S F, *et al.* Measurement of HL-2A NBI beam profile and beam power measurement[J]. Plasma Science & Technology, 2009, **11**: 613 – 618. DOI: 10.1088/1009-0630/11/5/19.
 - 18 Kick M, Sielanko J, Heinemann B, *et al.* Shielding of the NBI boxes against W7-X magnetic stray fields[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, **84**(2 – 6): 1020 – 1025. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.04.002.