

# 基于蒙特卡罗方法的 HL-3 装置中性束中性化送气优化研究

杨宪福, 余珮炫, 周博文, 周红霞  
(核工业西南物理研究院, 成都 610200)

**摘要:** 在磁约束聚变中性束加热系统的中性化器中, 足够的气体靶才能使离子束实现最佳中性化效率, 同时这些气体作为注入器真空室的气体负载, 希望越少越好。为了优化最佳气体靶厚所需的气体流量, 根据中性化器中气流态特性, 采用基于试验粒子蒙特卡罗方法的模拟程序对中性化器气体分子分布进行模拟, 该模拟程序研究分子与器壁碰撞反应的发射角度和飞行速度两个变量对分子密度的影响, 得到中性化送气的优化方案。研究表明, 中性化送气角度会影响气体靶厚, 送气角度与束流夹角  $150^\circ$  为最优; 中性化器壁温度也会影响气体靶厚, 相同气体流量在更低的温度下能得到更大的气体靶厚; 气体温度还会导致建立最佳气体靶厚的时间发生变化, 温度越低, 耗费的时间则越长。研究结果为中性化器结构的优化设计和实验控制提供了理论依据和数据支撑。

**关键词:** 中性束; 中性化效率; 蒙特卡罗方法; 气体靶厚

**中图分类号:** TB69; TL62

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7086(2025)02-0165-06

**DOI:** 10.12446/j.issn.1006-7086.2025.02.005

## Optimal Study on Neutralizer Gas Supply Base on Monte Carlo Method for HL-3 Neutral Beam Injection

YANG Xianfu, YU Peixuan, ZHOU Bowen, ZHOU Hongxia  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610200, China)

**Abstract:** In the neutralizer of the magnetic confinement fusion neutral beam heating system, the gas target is the medium for the ion beam to be converted to a neutral state, and sufficient gas target thickness can make the ion beam achieve the optimal neutralization efficiency. However, this gas is used as gas load in the vacuum chamber, and it is hoped that the less the better. In order to optimize the flow required for the optimal target thickness, it is expected to obtain the optimal target thickness with less gas flow. According to the molecular flow characteristics of the gas in the neutralizer, a code based on the test particle Monte Carlo method was used to simulate the distribution of the molecules in the neutralizer. In this code, the emission angle and flight velocity of molecules in the collision reaction were taken as the objects to study the molecular density, and the integral of molecular density in the length direction of the neutralizer reflected the size of the target thickness, so as to obtain the optimization scheme. The results show that the emission angle of the molecule after collision is random, but the neutralizer gas supply angle can affect the target thickness. The angle between the direction of the gas supply and the direction of the beam is the best at  $150^\circ$ , the worst at  $15^\circ$ , and it is consistent with the law of the average number of collisions of molecules in the neutralizer. After each collision, the molecule gets the temperature of the wall, which makes its flight velocity change, so the neutralizer wall temperature will also affect the target thickness. The same flow can obtain a larger target thickness at a lower temperature. In particular, when the temperature is below 100 K, the influence of temperature on the target thickness is more obvious, and the slope of linear fitting is 5 times that of higher than 100 K. The temperature also causes a change in the time to establish the optimal target thickness, and the lower the temperature, the longer the time. The results provide theoretical basis and data support for the optimal design of neutralizer structure and experimental control.

**Key words:** neutral beam injection; neutralization efficiency; Monte Carlo method; target thickness

收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 自然科学基金青年基金(11605045)

作者简介: 杨宪福, 硕士, 高级工程师。E-mail: [agate2003@outlook.com](mailto:agate2003@outlook.com)

## 0 引言

中性束注入加热是磁约束聚变最有效的辅助加热方式之一,中国环流 3 号<sup>[1]</sup>(HL-3)装置建造了一条基于灯丝弧放电的正离子源中性束注入加热系统<sup>[2-4]</sup>,2023-2024 年度物理实验中实现首次功率投入,在 HL-3 装置 1 MA 等离子体电流高约束(H 模)放电实验中起到关键性作用<sup>[5]</sup>。

中性束注入加热系统主要由离子源、中性化器、偏转磁铁、离子吞噬器和漂移管道组成。离子源引出的高能离子束流<sup>[6]</sup>进入中性化器,大部分转化为高能中性粒子,经漂移管道注入到等离子体中,未转化为中性的离子则被偏转磁铁偏转到离子吞噬器上。高能束流在传输过程中主要受到三个因素的影响:一是高能离子的空间电荷效应以及在引出面与气体分子碰撞产生的束散角,导致超过注入窗口范围的粒子会沉积在传输路径上;二是由于托卡马克具有强磁场,只有中性粒子才能注入到等离子体中,然而中性转化受碰撞反应截面的约束不能实现完全中性化,未中性转化的离子会被偏转到离子吞噬器上而损失;三是已转化为中性的高能粒子在后续的传输中会和气体分子碰撞,有少部分中性粒子会再电离而转化为离子,在托卡马克磁场的作用下损失在漂移管道上。

其中中性转化效率是对束流传输性能影响最大的,因此要尽可能地实现最大化的中性转化<sup>[7]</sup>。对于正离子束中性化器而言,中性化效率越大对应气体靶厚度越大,但气体靶厚度即气体分子密度大的话会增加引出电极处的碰撞,也会增加中性束在后续传输中的再电离,从而造成束功率损失。开展中性化送气优化研究的目的是要将对束流传输影响最大的中性化效率最大化,同时还要兼顾降低其他两个因素的影响。

## 1 中性化器

中性化器位于离子源后面,其作用是聚集一定的气体分子形成气体靶,高能离子束穿过气体靶时发生碰撞反应,俘获电子而转化为高能中性粒子。气体靶的来源有两处,一是离子源放电未电离的气体,通过电极孔流入中性化器,形成初始气体靶;二是当初始气体靶不足以实现束流的最佳中性化效率<sup>[8-9]</sup>,则需要在中性化器中部添加中性化送气。

气体靶厚又称气体线密度,定义为分子密度在沿束传输方向的中性化器长度积分<sup>[10]</sup>, $\pi = \int n dl$ 。为增加气体靶厚,每个离子源对应一个独立的中性

化器。其结构是截面为矩形的铜管,置于离子源引出电极之后,连接离子源放电室和注入器真空室,内部尺寸的长宽高为  $1.8 \text{ m} \times 0.18 \text{ m} \times 0.46 \text{ m}$ ,并在离子化器入口 700 mm 处设置中性化送气口。在离子源设置有离子源送气  $Q_s$ ,未电离的气体  $Q_{sr}$  通过电极孔流向中性化器,中性化送气  $Q_N$  位于距引出面 700 mm 处,如图 1 所示。

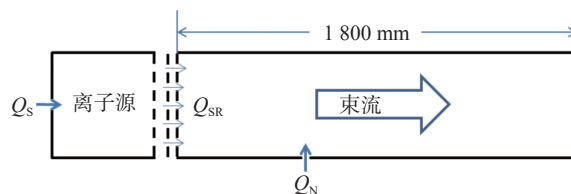


图 1 中性化器结构及气体源示意图

Fig. 1 Schematic of neutralizer structure and gas source

## 2 气体靶厚计算模型

离子源放电电压处于  $10^{-1} \text{ Pa}$  量级,真空室压力在大抽速低温泵的作用下维持在  $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ <sup>[11]</sup> 以下,使得中性化器压力处于  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$  范围,根据气体流态判据,中性化器气体处于分子流态,此时分子间的碰撞可以忽略,仅考虑分子与器壁的碰撞,且器壁不吸收也不释放新的气体分子,适用于试验粒子蒙特卡洛方法(Test Particle Monte Carlo, TPMC)<sup>[12]</sup> 模拟中性化器中气体密度的分布,基于蒙特卡罗方法的计算流程如图 2 所示。

要实现束流的最佳中性化效率,首先要根据中性化效率计算的微分方程组<sup>[10]</sup> 得到最佳中性化效率所需的最佳气体靶厚<sup>[8]</sup>;其次是根据离子源参数确定未电离的气体,采用蒙特卡罗方法计算这些气体在中性化器形成的初始气体靶厚,判断初始靶厚是否达到最佳气体靶厚,如不能,则需要在中性化器中段添加中性化送气;再次,最佳气体靶厚与初始气体靶厚之差即为中性化送气建立的气体靶厚,再次利用蒙特卡罗方法反向计算得到所需的中性化送气流量;最后添加计算所得的中性化送气量,建立最佳气体靶厚,实现最佳中性化效率。

80 kV/45 A 离子源气体利用率约为 0.5,引出束成分  $D^+ : D_2^+ : D_3^+ = 7 : 2 : 1$ ,根据引出电流的粒子数<sup>[13]</sup> 可以得出离子源未电离的气体为  $0.7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ,采用 TPMC 方法模拟计算得到离子源未电离气体形成的初始气体靶为  $3.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 。但此气体靶厚并不能实现束流的最佳中性化效率,需再添加  $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  中性化送气,使得靶厚达到  $6.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$

方可实现最佳中性化效率。

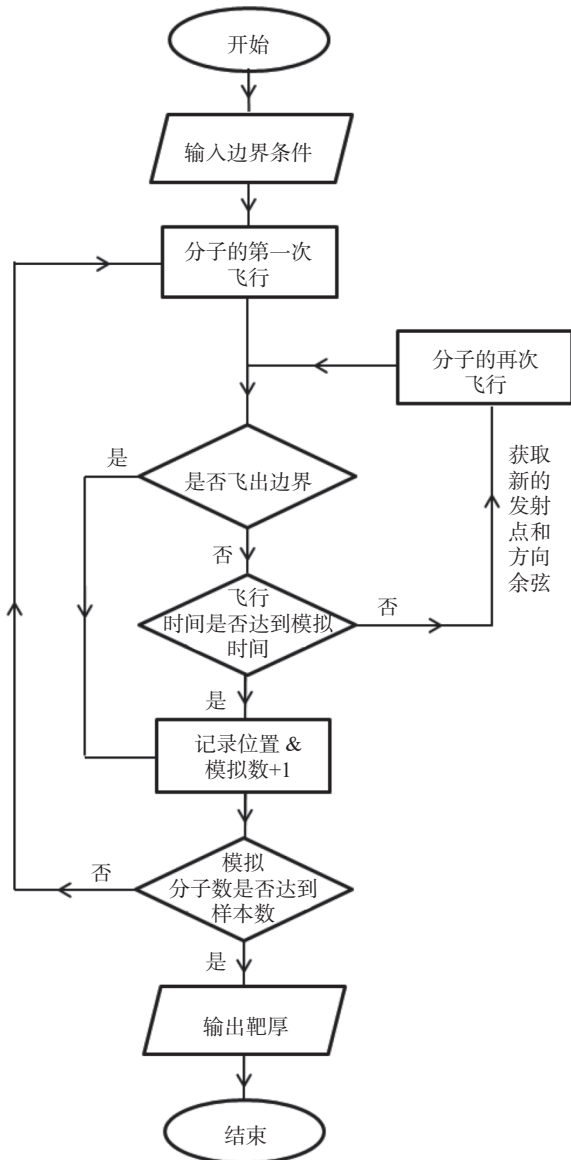


图2 基于蒙特卡罗方法靶厚计算流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation target thickness base on M-C method

### 3 模拟结果与讨论

#### 3.1 中性化送气角度

由克努曾余弦定律(Knudsen Cosine Law)可知,虽然分子在与器壁碰撞后的再次发射与入射角无关,但首次进入中性化器的分子发射角会对分子密度分布造成影响。

当送气时间非常短以至于分子和器壁未发生碰撞时,可以明显地发现分子密度随送气角度变化而变化。定义沿束流方向为 $0^\circ$ 角, $90^\circ$ 角送气时分子均匀地分布于送气口两侧(图3(b)); $45^\circ$ 角送气

时,大部分分布于中性化送气口右侧,意味着这部分分子首次与器壁的碰撞点偏向中性化器出口,甚至于直接飞出中性化器,后续进入中性化器的分子也会遵循此规律;反之亦然。图3为 $0.3\text{ ms}$ 时刻中性化送气的分子密度(归一化)分布示意图。

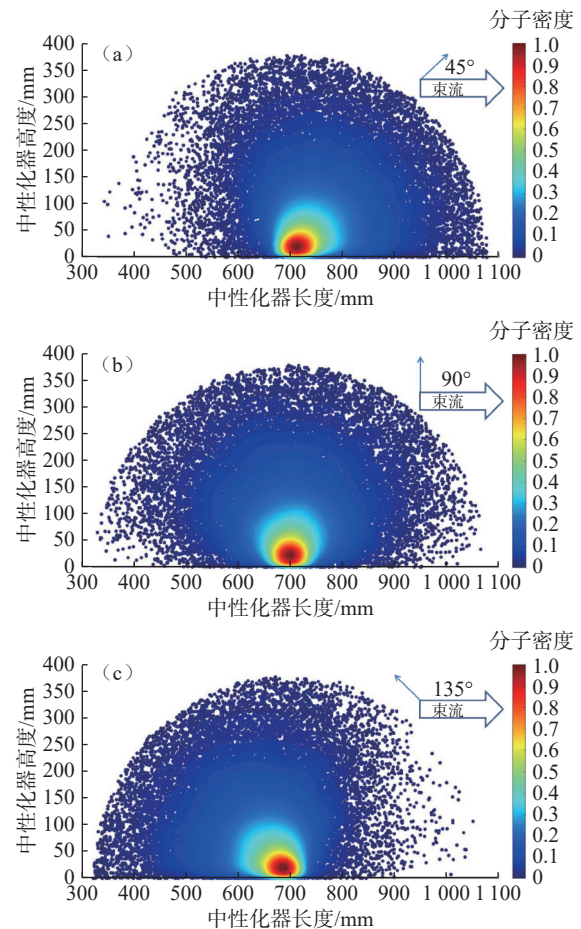


图3  $0.3\text{ ms}$  时不同角度送气时氘气气体分子分布

Fig. 3 Distribution of deuterium gas molecules at different angles at  $0.3\text{ ms}$

按不同角度持续送入相同流量的中性化气体,使中性化器压力达到平衡,得到气体靶厚随送气角度变化曲线,同时统计分子在中性化器中与器壁发生碰撞的平均次数,发现中性化送气形成的气体靶厚会随送气角度发生变化,且平均碰撞次数的规律也随送气角度发生变化,二者变化规律一致,说明分子与器壁的平均碰撞次数会影响气体靶厚的大小。

送气角度小于 $90^\circ$ 时,大部分气体分子与器壁的首次碰撞发生在偏向出口方向,直接飞出和后续多次碰撞飞出中性化器的几率增加。当气体入射角为 $15^\circ$ 时,分子与器壁的平均碰撞次数最少,得到

的气体靶厚也最小,而角度再小时,更多的气体分子会就近与底面发生首次碰撞,使得平均碰撞次数有所增加。当送气角度大于  $90^\circ$  时,大部分分子与器壁的首次碰撞发生在远离出口方向,分子在电极引出面会反射回中性化器,使得平均碰撞次数增加。当入射角度为  $150^\circ$  时得到的气体分子密度最大,平均碰撞次数亦然,如图 4 所示。

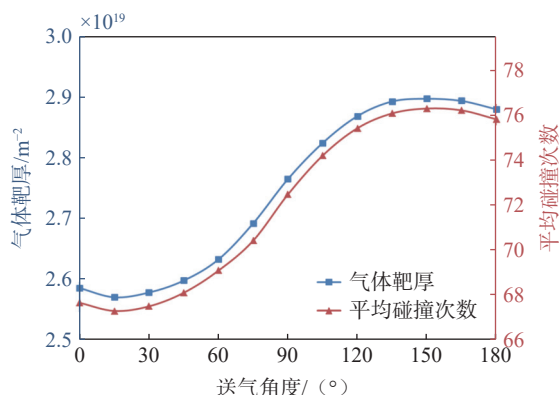


图 4 中性化送气建立的气体靶厚随送气角度变化的关系

Fig. 4 Relationship of target thickness by neutralizer gas with supply angle

### 3.2 器壁温度对靶厚的影响

气体分子和器壁碰撞时被短暂地“吸附”,发生能量交换和动量交换,再发射时获得器壁的温度。而气体分子和器壁的平均碰撞次数远大于 1 次,故气体分子初始温度对分子密度的影响微乎其微,仅考虑器壁温度的影响。

分子在中性化器中做自由热运动,其平均速度只与温度相关,温度越高,速度越快。分子速度越快,平均碰撞次数不变的情况下,即飞行路径相同,单位时间内飞出中性化器的分子则越多,造成密度下降。因此,降低分子运动速度能有效地提高分子密度。

中性化器外设置蛇形水道,冷却水的温度比室温低 10 K 左右,得到的分子密度则比室温时分子密度大,尽管这个优势不太明显。如需更小的气体流量实现最佳气体靶厚,则需要采用更低温度的冷却剂。

中性束低温泵液氮回路出口的冷氮气大约 90 K,作为废气直接排空。利用冷氮气直接冷却中性化器,这样能将中性化器冷却到 100 K 左右,此时分子热运动的平均速度降至室温下的 58%,气体分子停留在中性化器的时间变长,宏观表象即为中

性化器内的平均分子密度增加,此时的分子平均密度是室温时的 1.7 倍。为增大分子密度,继续降低中性化器的器壁温度,采用低温泵氮回路出口的冷氮气冷却器壁能继续降低中性化器的器壁温度。使用冷氮气作为冷却剂时温度应高于氙气的沸点,以避免气体分子被真正吸附在中性化器壁上,因此将冷氮气控制在 30 K 左右。此时分子热运动的速度降低至室温时的 28%,分子平均密度则为室温时的 3.1 倍。

由此可见分子平均速度对平均密度的影响非常明显,且平均密度随温度变化的规律与平均速度倒数随温度变化的规律一致。温度高于 100 K 时,密度随温度的变化率相对平缓,而在温度低于 100 K 时,密度随温度的变化率更明显,前者线性拟合的斜率超过后者的 5 倍,如图 5 所示。

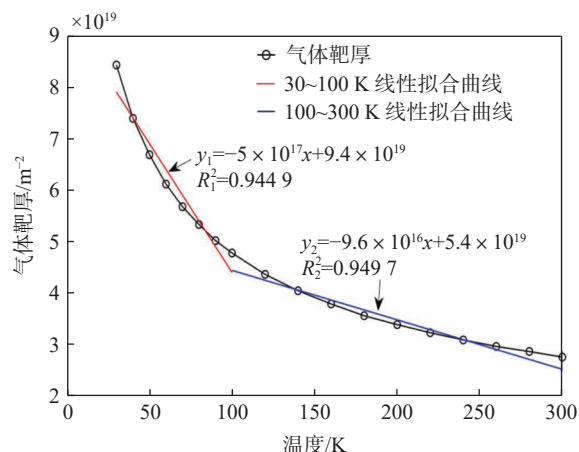


图 5 中性化送气建立的气体靶厚随温度变化曲线

Fig. 5 Curve of target thickness by neutralizer gas with temperature

温度对中性化送气所建立的气体靶厚影响的同时,温度对离子源未电离气体形成的初始气体靶厚同样会产生影响,且影响趋势是一致的。因此随着温度的降低,初始气体靶厚会不断增加,需要添加的中性化送气流量越来越小,真空室的气体负载就更小。当温度降至 90 ~ 100 K,初始气体靶厚达到了最佳气体靶厚的要求,此时无须再添加中性化送气,图 6 为 80 keV/45 A 束流的初始气体靶厚随温度变化以及最佳气体靶厚所需的中性化送气量的关系。

### 3.3 最佳气体靶建立时间

分子进入中性化器后以热运动速度建立气体靶,从进入到平衡态需要一定的时间。气体分子和

器壁碰撞后从后者获取能量再发射, 不同的器壁温度使分子获得不同的热运动速度, 建立最佳气体靶厚所需的时间不同。室温 300 K 时氘气仅需 65 ms 即可建立最佳气体靶厚, 但随着温度的降低, 分子热运动速率下降, 所需时间则会随之增加, 当气体温度降至 30 K 时, 则需耗费 260 ms 才能建立起最佳气体靶厚, 如图 7 所示。

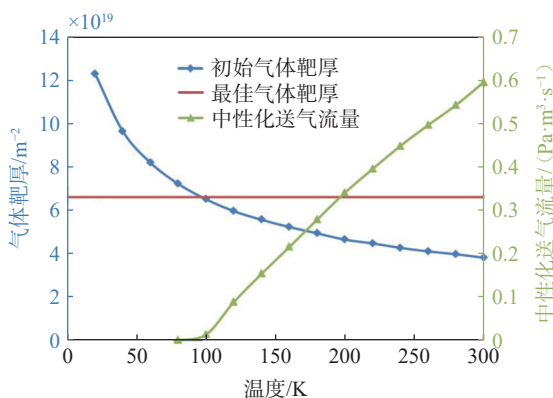


图 6 80 keV/45 A 氘离子束的初始气体靶厚与中性化送气流量随温度变化曲线

Fig. 6 Curve of the initial target thickness and the neutralizer flow with temperature for 80 keV/45 A  $D^+$  beam

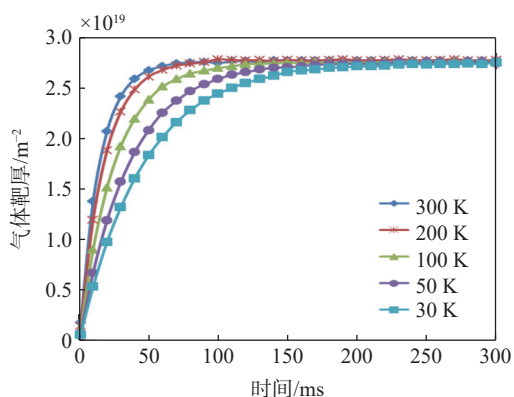


图 7 不同温度气体建立最佳气体靶厚的过程

Fig. 7 Process of establishing the optimal target thickness at different temperatures

80 kV 的氘离子的速度为  $2.8 \times 10^6$  m/s, 穿过 1.8 m 长的中性化器时间不足  $1 \mu\text{s}$ 。既要实现全束流的最佳中性化效率, 又不过多增加气体负载, 要求束流进入中性化器的时刻即为最佳气体靶厚建立的时刻。最佳气体靶厚建立过早会增加气体负载, 过晚则束流前端未实现最佳中性化效率。根据中性化器壁的温度条件, 将中性化送气时刻设置于束流引出时刻之前, 补偿最佳气体靶厚建立所耗

费的时间。图 8 为不同温度下氘气建立最佳气体靶厚所需的时间曲线, 从图中可见, 气体温度越低, 最佳气体靶厚建立的时间越长, 特别是在低于 100 K 后, 由于分子运动速率明显下降, 所耗费的时间明显变长。同时可以看到, 不同温度建立最佳气体靶厚所需的送气流量的差异, 温度越低, 所需的气体流量越小。

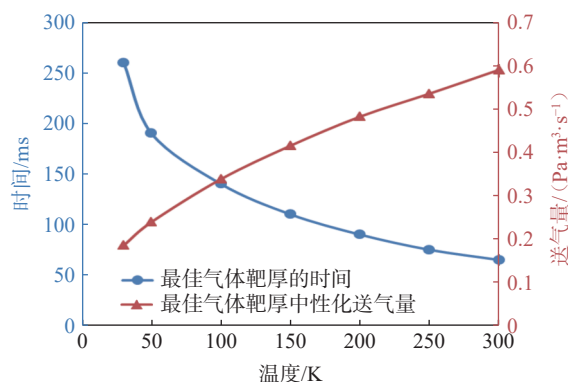


图 8 不同温度条件下建立最佳气体靶厚耗时以及送气流量

Fig. 8 Time and flow for establishing the optimal target thickness at different temperatures

#### 4 总结

为实现最佳中性化效率时中性化送气量最优化, 根据中性化器中气体处于分子流态的特性, 基于试验粒子蒙特卡罗方法模拟中性化器气体分子分布情况, 能有效地模拟不同情况下分子的动态分布, 从而了解和掌握不同因素对气体靶厚的影响, 进而调整优化, 使得离子束实现最佳中性化效率时注入器的真空负载最优化。首先是研究中性化送气的入射角度对气体靶厚的影响。模拟显示送气角度与气体靶厚呈类余弦函数的曲线, 当送气角度与束流方向夹角为  $150^\circ$  时, 相同送气量得到的气体靶厚最大,  $15^\circ$  时为最小, 气体分子在中性化器中平均碰撞次数的规律与之相同。其次是研究中性化器壁温度对气体靶厚的影响。采用不同温度的冷却剂, 使得气体分子获得更低的运动速率, 从而延长在中性化器中的滞留时间, 获得更高的气体靶厚, 研究还发现温度在 100 K 以下时, 气体靶厚随温度变化的趋势更明显, 是 100 ~ 300 K 区间的 5 倍之多。当温度降至 90 K 以下, 无须添加中性化送气即可满足最佳中性化效率的需求。最后是研究最佳气体靶厚的建立过程, 发现不同温度会导致建立时间有数倍的差异, 要实现全束流的最佳中性化效率, 需根据器壁温度条件将中性化送气时刻提前以

补偿建立所耗费的时间。

#### 参考文献:

- [1] LI Q, HL-2M TEAM. The component development status of HL-2M Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 96/97: 338–342.
- [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(增刊 2): 489–494.
- [3] CAO J Y, WEI H L, ZOU G Q, et al. Conceptual design of 5MW-NBI injector for HL-2M Tokamak [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(6/8): 872–877.
- [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.
- [5] ZHONG W, HL-3 TEAM (2024). China's HL-3 Tokamak achieves H-mode operation with 1 MA plasma current[J]. *The Innovation*, 2024, 5(1): 100555.
- [6] 魏会领, 曹建勇, 杨宪福, 等. HL-2A 装置中性束离子源引出系统束流分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(11): 114006.
- [7] 杨宪福, 魏会领, 万银祥, 等. HL-3 装置 7 MW 中性束传输效率研究 [J]. *核技术*, 2024, 47(5): 050011.
- [8] BERKNE K H R, PYLE R V, STEARNS J W. Intense, mixed-energy hydrogen beams for CTR injection [J]. *Nuclear Fusion*, 1975, 15(2): 249–254.
- [9] 杨宪福, 谢炜民, 魏会领, 等. HL-2A 装置 NBI 中性化室气靶厚度与中性化效率 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2014, 34(1): 6–11.
- [10] 张华顺. 离子源和大功率中性束源 [M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
- [11] 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.
- [12] KLEPPER C C, RAVELLI F A. Monte carlo analysis of the performance of the ITER diagnostic residual gas analyzer [J]. *Fusion Science and Technology*, 2021, 77(7/8): 629–640.
- [13] ZHU WU, CHEN LIAN, HU CHUNDONG, et al. Analysis on pressure distribution in HT-7 neutral beam injection system[J]. *Plasma Science & Technology*, 2005, 7(2): 2719–2722.

(责任编辑: 杨建斌)

引文信息: 杨宪福, 余珮炫, 周博文, 等. 基于蒙特卡罗方法的 HL-3 装置中性束中性化送气优化研究[J]. *真空与低温*, 2025, 31(2): 165–170.

YANG X F, YU P X, ZHOU B W, et al. Optimal study on neutralizer gas supply base on Monte Carlo method for HL-3 neutral beam injection[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2025, 31(2): 165–170.