

等离子体窗密封性能实验研究

苑聪聪¹, 刘建星¹, 王思蜀², 陈波¹,
陈建军¹, 王宏彬¹, 叶宗标¹, 苟富均¹

(1. 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064;

2. 四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610064)

摘要: 等离子体窗具有高真空密封性和良好的束流通过性, 在电子束焊接、加速器等领域有很大的应用前景. 针对传统等离子体窗应用孔径小的问题, 本文在优化的三阴极源基础上研究了通道直径为 7 mm 和 8 mm 等离子体窗的密封特性, 以及 Ar、He、H₂ 三种等离子体窗压降系数随输入电流和气流量的变化关系. 结果显示, 在输入电流 120~210 A、气流量 1000~5000 sccm 范围内, Ar 等离子体窗的压降系数随输入电流、气流量的增加呈先上升后下降的变化趋势, He、H₂ 等离子体窗的压降系数随输入电流的增加逐渐上升, 但随着气流量的增加, He 等离子体窗的压降系数先上升后下降, H₂ 等离子体窗的压降系数逐渐下降. 本实验获得的等离子体窗最大压降系数为 2550, 可隔绝的最大高压为 1 atm, 与已报道文献相比具备较好的竞争优势, 展现了良好的密封性, 在未来加速器等领域有很大的应用潜力.

关键词: 等离子体窗; 压降系数; 密封; 加速器

中图分类号: O53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.014002

Experimental study of plasma window sealing performance

YUAN Cong-Cong¹, LIU Jian-Xing¹, WANG Si-Shu², CHEN Bo¹,
CHEN Jian-Jun¹, WANG Hong-Bin¹, YE Zong-Biao¹, GOU Fu-Jun¹

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

2. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Plasma windows with a high vacuum tightness and a good beam throughput have promising applications in electron beam welding, accelerators and so on. This paper, aiming at the small-size problems of traditional plasma window apertures, presents the sealing characteristics of the plasma windows with channel diameters of 7 mm and 8 mm on the basis of the optimized three cathode sources. The relationship between the pressure drop coefficient (PDC) of Ar, He and H₂ and such experimental parameters as the input current and gas flow rate is studied, respectively. The input current was ranged from 120 to 210 A and the gas flow rate was done from 1000~5000 sccm. The results show that the PDC of the Ar plasma window firstly increases and then decreases with the increases of both the input current and gas flow rate. Differently, the PDC of the He and H₂ plasma windows gradually increases with the increase of the input current, and with the increase of gas flow rate, the PDC of the He plasma window firstly increases and then decreases and the PDC of the H₂ plasma window gradually decreases. The

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金(2019BC02)

作者简介: 苑聪聪(1999-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为核技术及应用. E-mail: 1790938267@qq.com

通讯作者: 苟富均. E-mail: gfulun@scu.edu.cn; 叶宗标. E-mail: zbye@scu.edu.cn

maximum PDC of the plasma windows obtained in this work is 2550, and the isolatable maximum high pressure is 1 atm. Compared with the reported literatures, these data mean that the developed plasma windows have a good competitive advantage and shows a good sealing performance for potential applications in fields of future accelerators.

Keywords: Plasma window; Pressure drop coefficient; Seal; Accelerator

1 引言

为了实现高能粒子束与不同靶的相互作用,需要将高能粒子束从高真空环境引出到高压环境,并对高压和真空进行隔离密封,以确保粒子束的顺利引出.然而,传统的固态金属薄壁密封方式容易导致粒子束能量损失和能散,同时长期使用也容易受到破坏,导致真空泄露等严重问题.与金属薄壁密封方式相比,等离子体窗是一种无窗气体靶系统,没有实体密封所具有的损伤缺陷,具有较长的寿命,可实现电子束、离子束以及 X 射线等束流从低气压到高压的引出^[1-4],消除了对束流强度、能量等的限制^[5],因而倍受关注. Salerno 等^[6]对等离子体窗在气体靶上的应用进行了改善并率先讨论了等离子体窗在加速器上应用的可能性.在此基础上, Krasik 等^[7]对等离子体窗的基本特性进行了研究,获得了等离子体参数的空间分布.北京大学的 Huang 等人^[8]通过数值模拟初步解释了等离子体窗运行的物理机制,表明了高的等离子体密度有利于获得高的密封特性.三阴极等离子体源是获取高密度等离子体的常用方式.出于等离子体稳定性的考虑,以往的实验主要集中在对 6 mm 以下通道孔径等离子体窗的研究,而小孔径等离子体窗可引出的束流强度有限,为了获得高强度的束流,需要研究更大孔径的等离子体窗. Shi 等人^[9]基于北京大学构建的等离子体窗对 6 mm 通道孔径进行了测试,证明了大孔径等离子体窗的可行性.但对更大通道孔径等离子体窗的研究表明,大通道孔径等离子体窗的压降系数较低,密封效果不理想^[10,11],而且这些实验较少涉及对压降系数影响因素的实验研究.

传统的等离子体窗主要采用的是单阴极级联弧等离子体源^[6,9].为了进一步提高等离子体窗的压降系数,本实验采用四川大学先进核能与氢能实验室自主研发的直线等离子体装置三阴极直流级联弧放电等离子体源产生等离子体.产生的等离子体由于放电腔室与真空腔室的巨大压差从喷口以超音速的速度喷出并向真空腔室扩散,经过一个超

音速扩展与震动过程,可以形成亚音速的稳定等离子体束.其中,三阴极直流级联弧放电等离子体源通过三根阴极钨针耦合工作,通过提高电子产生效率,有效增强 H₂ 离化程度,提高等离子体参数,进而实现等离子体窗压降系数的增强^[12].基于此装置,本文对 Ar、He 和 H₂ 三种等离子体窗开展实验研究,分析通道孔径、气流量和输入电流对等离子体窗密封特性的影响,并对 Ar、He、H₂ 三种等离子体窗的密封效果进行比较.

2 实验

2.1 实验装置

本实验采用三阴极等离子体源获得高密度、高通量的等离子体,为了满足实验要求,对三阴极源进行了优化,采用级联铜板提高放电参数进而提高等离子体参数^[13].放电通道材料采用耐高温的钨铜合金,有利于承受高密度的等离子体.本实验采用四川大学先进核能与氢能实验室自主研发的三阴极直流级联弧放电等离子体源构建等离子体窗.整套实验装置如图 1 所示,主要包括等离子体电源、真空抽气系统、真空测量系统、供气系统以及三阴极等离子体源.等离子体电源可提供的输入电流范围为 120~210 A,输入电流平均分配到三个阴极上.真空抽气系统由滑阀泵 1、滑阀泵 2、600 罗茨泵和 2500 罗茨泵组成,可将真空腔室内的压强抽到 6×10^{-2} Pa 以下.供气系统控制 Ar、He 和 H₂ 三种气体的进气量,本实验控制气体的流量范围为 1000~5000 sccm.真空测量系统采用 INFICO 电容式真空计 CDG025D 分别测量进气端压强 p_1 和真空腔室内的压强 p_2 .

实验所用三阴极等离子体源结构如图 2 所示,主要包括三个阴极、阴极底座、阳极底座和 5 块级联铜板.每个铜板的厚度为 7 mm,等离子体窗总长度为 35 mm.本实验所用铜板中心孔径有 7 mm 和 8 mm 两种.各铜板通过中心钨铜合金的圆孔形成等离子体窗通道,铜板之间的绝缘圈、绝缘垫片及四氟片使各铜板间互相绝缘.等离子体源阴极底座连接进气口,阳极底座连接真空腔室.实验通过

冷却水对等离子体窗各部件进行冷却,防止实验过程中出现装置过热的情况。

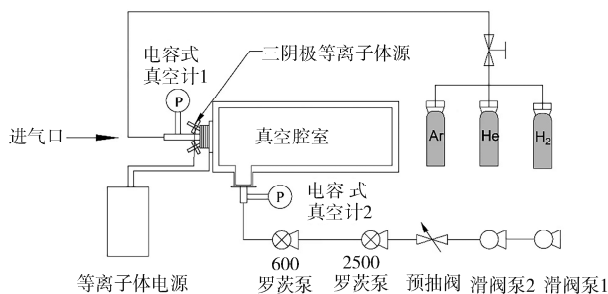


图 1 等离子体窗实验装置

Fig. 1 Plasma window experimental device

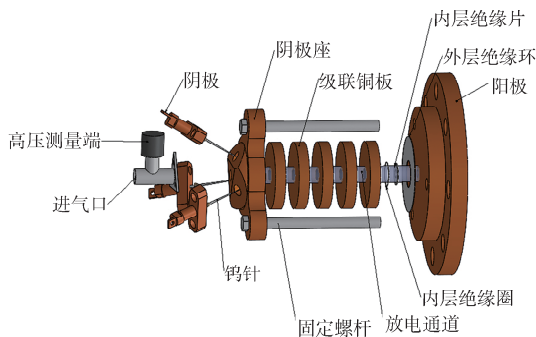


图 2 三阴极等离子体源三维分解图

Fig. 2 Three-dimensional decomposition diagram of three-cathode plasma source

2.2 实验原理与方法

等离子体窗隔绝高压主要依靠压力平衡效应,比如在压力平衡状态下,根据理想气体状态方程 $p = nkT$,高温等离子体 ($T=12\ 000\text{ K}$) 的密度相当于室温 ($T=300\text{ K}$) 气体密度的 $1/40$,低的等离子体密度可降低粒子束引出过程中由于碰撞导致的能量损失,有利于束流的引出.此外,动力黏度效应也是等离子体窗隔绝高压的另一重要因素.根据泊肃叶公式,层流状态下气体通过圆柱形管道产生的压降为

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{16}{\pi} \eta \frac{1}{r^4} NRT \quad (1)$$

当 p_1 远大于 p_2 时,可近似得到入口气压 p_1 .

$$p_1 = 2.26 \frac{\sqrt{\eta k N T}}{r^2} \quad (2)$$

其中, η 为气体黏度系数; l 为通道长度; k 为玻尔兹曼常数; N 表示粒子数流量; T 为气体温度; r 为通道半径. 等离子体的黏度系数主要与等离子体温度有关,比如氩等离子体在 $10\ 000\text{ K}$ 时的黏度系数为 2.42×10^{-4} ,约为室温下氩气黏度系数的 10 倍^[14]. 而高的黏度系数有利于提高可维持的高压. 因此,压力平衡效应和动力黏度效应的共同作用使

等离子体窗两端产生巨大的压强差。

实验首先打开冷却水系统并使用真空抽气系统将腔室内压强抽到 $6 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ 以下,通过供气系统控制气体种类和进气量,进气量范围为 $1000 \sim 5000\text{ sccm}$. 通过等离子体电源调节输入电流,输入电流范围为 $120 \sim 210\text{ A}$. 三阴极等离子体源放电产生等离子体,形成等离子体窗,在等离子体窗两端产生巨大的压强差. 电容式真空计 1、2 分别测量进气端压强 p_1 和真空腔室内的压强 p_2 ,通过计算得到等离子体窗的压降系数 p_1/p_2 .

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

实验得到的 Ar、He 和 H_2 三种等离子体窗压降系数随输入电流和进气流量的变化关系如图 3 所示. 由图 3a,在输入电流为 $120 \sim 165\text{ A}$ 范围内,随输入电流的增加,Ar 等离子体窗压降系数逐渐增加. 在输入电流为 $165 \sim 210\text{ A}$ 范围内,Ar 等离子体窗的压降系数随输入电流的增加不再单调变化,而发生振荡. 其压降系数在输入电流为 195 A , 气流量为 2000 sccm 时达到最大值 2550. 输入电流的变化还使 Ar 等离子体窗的压降系数随气流量变化的峰值发生变化. 在输入电流为 $120 \sim 165\text{ A}$ 范围内,Ar 等离子体窗的压降系数在气流量为 2000 sccm 达到峰值,而输入电流为 180 和 210 A 时,压降系数在气流量为 1500 sccm 处达到峰值. 气体流量的增加导致 Ar 等离子体窗的压降系数先增加后下降,如前所述,压降系数峰值因输入电流的不同出现在 1500 sccm 附近或 2000 sccm 附近. 由图 3b,He 等离子体窗的压降系数在输入电流为 $120 \sim 210\text{ A}$ 范围内随输入电流的增加而逐渐增加,且在气流量为 2500 sccm 以上的压降系数增加幅度大于在气流量 2500 sccm 以下的增加幅度. 在输入电流为 210 A , 气流量为 5000 sccm 时,He 等离子体窗的压降系数达到最大值 1340. 在输入电流为 165 A 以下时,He 等离子体窗的压降系数随气流量的增加先上升后下降,当输入电流高于 165 A 时,其压降系数随气流量的增加逐渐增加. 由图 3c, H_2 等离子体窗的压降系数随输入电流的增加逐渐增加,且在 $120 \sim 150\text{ A}$ 的增加幅度大于在 $150 \sim 180\text{ A}$ 的增加幅度. 随着气流量的增加, H_2 等离子体窗的压降系数逐渐下降. 在输入电流为 180 A , 气流量为 1000 sccm 时, H_2 等离子体窗的压降系数达到最大值 1616.

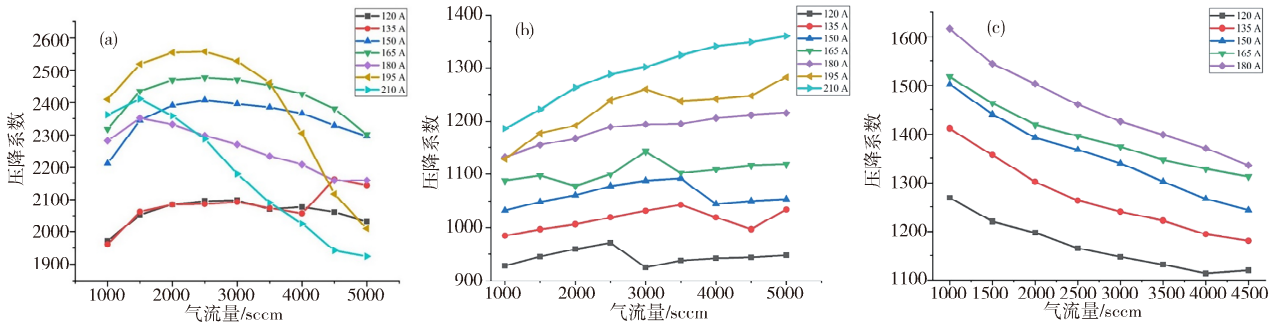


图 3 7 mm 通道孔径 Ar、He 和 H₂ 等离子体窗实验结果: (a) Ar 等离子体窗压降系数(p_1/p_2)随输入电流和气流量的变化关系; (b) He 等离子体窗压降系数(p_1/p_2)随输入电流和气流量的变化关系; (c) H₂ 等离子体窗压降系数(p_1/p_2)随输入电流和气流量的变化关系

Fig. 3 The experimental results of Ar, He and H₂ plasma windows with 7 mm channel aperture: (a) The pressure drop coefficient (p_1/p_2) of Ar plasma window varies with input current and gas flow; (b) The pressure drop coefficient (p_1/p_2) of He plasma window varies with input current and gas flow; (c) The pressure drop coefficient (p_1/p_2) of H₂ plasma window varies with input current and gas flow

在输入电流为 120~210 A 范围内,我们从低到高选取了 120 A、150 A 和 180 A 的输入电流进行实验,对比 7 mm 和 8 mm 通道孔径的压降系数. 实验结果如图 4 所示. 由实验结果可知,在所选取的输入电流条件下,Ar、He 和 H₂ 三种等离子体窗在 7 mm 通道孔径下的压降系数皆远高于 8 mm 通道孔径的压降系数,表明通道孔径的增加会使等离子体窗的密封性能明显变差. 由图 4a 可知,两种通道孔径下,Ar 等离子体窗压降系数随气流量的变化趋势基本相同,但随输入电流的变化趋势有所差别. 在 7 mm 通道孔径下,Ar 等离子体窗压降系数随输入电流的增加先上升后下降,但在 8 mm 通道孔径下,压降系数随输入电流的增加逐渐增加. 在 7 mm 和 8 mm 通道孔径下,Ar 等离子体窗的

压降系数在输入电流为 150 A 时相差最大,达到 600. 与 Ar 等离子体窗不同,在两种通道孔径下,He 等离子体窗的压降系数随输入电流的变化趋势保持一致,但随气流量的变化有所差别. 由图 4b,两种通道孔径下,He 等离子体窗的压降系数皆随输入电流的增加而增加,但在输入电流为 120 A 和 150 A 时,7 mm 通道孔径的 He 等离子体窗压降系数先随气流量的增加而增加,在气流量为 2500 scfm 或 3500 scfm 时开始下降,随后缓慢增加. 而在 8 mm 通道孔径下,He 等离子体窗的压降系数随气流量的增加一直缓慢增加. 对于 H₂ 等离子体窗,如图 4c 所示,随输入电流和进气量的增加,其压降系数的变化趋势在两种通道孔径下保持一致.

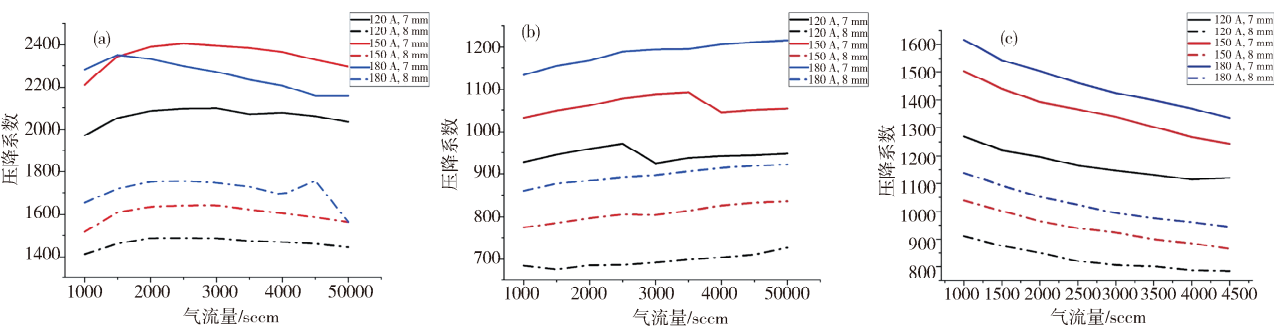


图 4 7 mm 和 8 mm 通道孔径下,Ar、He、H₂ 等离子体窗压降系数对比: (a) 7 mm 和 8 mm 通道孔径 Ar 等离子体窗压降系数对比; (b) 7 mm 和 8 mm 通道孔径 He 等离子体窗压降系数对比; (c) 7 mm 和 8 mm 通道孔径 H₂ 等离子体窗压降系数对比

Fig. 4 Comparison of pressure drop coefficient of Ar, He and H₂ plasma windows with 7 mm and 8 mm channel aperture: (a) Comparison of pressure drop coefficient of Ar plasma window with 7 mm and 8 mm channel aperture; (b) Comparison of pressure drop coefficient of He plasma window with 7 mm and 8 mm channel aperture; (c) Comparison of pressure drop coefficient of H₂ plasma window with 7 mm and 8 mm channel aperture

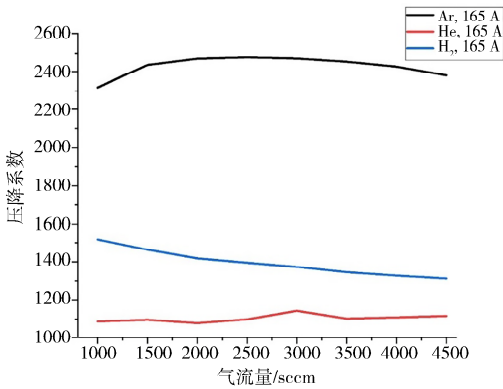


图 5 Ar、He 和 H₂ 等离子体窗压降系数对比

Fig. 5 Comparison of pressure drop coefficients of Ar, He and H₂ plasma windows

最后实验对比了 Ar、He 和 H₂ 三种等离子体窗的密封特性, 结果如图 5 所示. 在所测气流量范围内, Ar 等离子体窗压降系数随气流量的增加先逐渐上升, 然后保持稳定, 最后逐渐下降, H₂ 等离子体窗压降系数随气流量的增加逐渐下降, He 等离子体窗压降系数随气流量的增加变化不大. 在输入电流为 165 A、气流量为 1000~4500 sccm 范围内, Ar 等离子体窗的压降系数最大约为 2400, H₂ 等离子体窗压降系数最大约为 1500, He 等离子体窗压降系数最大约为 1100. 由此可知, 在该条件下, Ar 等离子体窗的密封特性最好, H₂ 等离子体窗次之, He 等离子体窗最差.

3.2 分析与讨论

在气流量一定的条件下, 输入电流通过影响等离子体温度和密度改变等离子体窗的压降系数. 由于实验装置的限制, 实验无法获得在等离子体产生处的等离子体温度、等离子体密度等相关参数. 但由以往实验可知, 等离子体温度、等离子体密度随输入电流的变化皆呈指数变化关系^[12,15]. 此外, 等离子体温度的变化又会影响等离子体的黏度系数, 且 Ar、He、H₂ 三种等离子体的黏度系数随温度的增加呈先上升后下降的变化趋势^[16,17]. 由于 Ar 的电离能明显小于 He、H₂ 的电离能, 因此输入电流的增加使 Ar 等离子体温度增加得更快, 进而其黏度系数随温度增加的变化趋势由逐渐上升转为逐渐下降, 导致 Ar 等离子体窗的压降系数随输入电流的增加呈先上升后下降的变化趋势, 而非如 He、H₂ 等离子体窗压降系数随输入电流的增加逐渐上升的变化趋势.

在输入电流一定的情况下, 气流量的增加会导致进气口的气压增大, 由压力平衡效应, 等离子体的密度会有所增加, 等离子体密度的变化影响等离

子体温度, 进而引起等离子体黏度系数的变化. 然而等离子体黏度系数、离子密度和温度与进气流量并不呈现简单的线性关系. 如以往的研究所示^[18], 在低进气流量, 等离子体温度和密度随气流量的变化一般会呈现一定的线性关系, 但是在气流量增大以后, 由于过高的进气流量会增大电离难度, 常会出现“衰减”或“饱和”现象, 因此压降系数随气流量的变化不呈现式(2)所描述的变化趋势. 在相同输入电流条件下, 由于电离能的不同, 三种等离子体的温度不同, 且由文献[16,17]可知, 在 5000~20000 K 范围内, Ar 和 H₂ 等离子体黏度系数相差约 10 倍, 因而等离子体温度以及黏度系数等物理特性的差异导致 Ar、He 和 H₂ 等离子体窗的压降系数随气流量的变化最终呈现出不同的变化趋势.

通道孔径的变化影响等离子体窗可隔绝的高压, 由式(2)可知, 等离子体窗可隔绝的高气压端气压与通道半径的平方成反比. 因此, 7 mm 通道孔径等离子体窗的压降系数明显高于 8 mm 等离子体窗的压降系数.

4 结论

本实验研究了通道孔径、输入电流以及气流量对 Ar、He 和 H₂ 三种等离子体窗压降系数的影响. 由实验得到, Ar 等离子体窗的压降系数在输入电流 120~210 A 范围内随输入电流的增加先上升后发生振荡变化, 在输入电流为 195 A 时达到最大值, 且当输入电流大于 195 A 时, 压降系数随气流量变化的峰值可提前至 1500 sccm. He、H₂ 等离子体窗的压降系数在输入电流为 120~210 A 范围内皆随输入电流的增加逐渐上升. 在输入电流为 120~210 A 范围内, Ar 等离子体窗的压降系数随气流量的增加先上升后下降, 在气流量为 1500 或 2000 sccm 时达到峰值, He 等离子体窗的压降系数在输入电流为 165 A 以下随气流量的增加先上升后下降, 当输入电流高于 165 A 时, 压降系数随气流量的增加而逐渐上升; H₂ 等离子体窗的压降系数随气流量的增加逐渐下降. 在输入电流为 120~210 A, 气流量为 1000~5000 sccm 范围内, 7 mm 通道孔径的 Ar、He、H₂ 三种等离子体窗压降系数最大分别可达到 2550、1340 和 1616, 8 mm 通道孔径下 Ar、He、H₂ 三种等离子体窗压降系数最大分别可达到 1880、1000 和 1140. 在输入电流为 165 A, 气流量 1000~4500 sccm 条件下, Ar 等离子体窗的密封性能最好, H₂ 等离子体窗次之, He 等离

子体窗的密封性能最差.

参考文献:

- [1] Hershcovitvh A. High-pressure arcs as vacuum-atmosphere interface and plasma lens for non-vacuum electron beam welding machines, electron beam melting, and nonvacuum ion material modification [J]. *Appl Phys*, 1995, 78: 5283.
- [2] Hershcovitvh A. Non-vacuum electron beam welding through a plasma window [J]. *Nucl Instrum Methods Phys B*, 1999, 152: 515.
- [3] Pinkoski B T, Zacharia I, Hershcovitch A, *et al.* X-ray transmission through a plasma window[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72: 1677.
- [4] Hershcovitvh A. A plasma window for transmission of particle beams and radion from vaccum to atmosphere for various applications[J]. *Phy Sci Instrum*, 1998, 5: 2130.
- [5] Gerber W, Lanza R C, Hershcovitch A, *et al.* The plasma porthole; a windowless vacuum-Pressure interface with various applications[J]. *Phy Sci Instrum*, 1998, 5: 2130.
- [6] Salerno D, Pinkoski B T, Hershcovitch A, *et al.* Windowless targets for intense beams [J]. *NIM A*, 2001, 469: 13.
- [7] Krasik Ya E, Gleizer S, Gurovich V, *et al.* Plasma window characterization [J]. *Appl Phys*, 2007, 101: 053305.
- [8] Huang S, Zhu K, Shi B L, *et al.* Numerical simulation study on fluid dynamics of plasma window using argon [J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 1.
- [9] Shi B L, Huang S, Zhu K, *et al.* Experimental study of the plasma window [J]. *Chinese Phys C*, 2014, 1: 1.
- [10] Wang S Z, Zhu K, Huang S, *et al.* Theoretical and experimental investigation on magneto-hydrodynamics of plasma window [J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 013505.
- [11] Ikoma N, Miyake Y, Takahashi M, *et al.* Demonstration of plasma window with 20 mm diameter and pressure separation for accelerator applications [J]. *Plasma Fusion Res; Rapid Commun*, 2019, 14: 1206148.
- [12] Zhang Z Y, Cao X G, Han L, *et al.* Diagnosing characteristics of helium plasma generated by triple-cathode cascaded arc plasma source [J]. *Chin J Vac Sci Technol*, 2017, 37: 1102. [张志艳, 曹小岗, 韩磊, 等. 三阴极级联弧源下等离子体的特性研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37: 1102.]
- [13] Ou W, Deng B Q, Zeng X J, *et al.* Characteristics of single cathode cascaded bias voltage Arc plasma [J]. *Plasma Sci Technol*, 2016, 18: 627.
- [14] Murphy A B, Arundell C J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas [J]. *Plasma Chem Plasma Process*, 1994, 14: 451.
- [15] Cao X G, Xia Y X, Chen B Z, *et al.* Langmuir probe measurements of an expanding argon plasma [J]. *Plasma Sci Technol*, 2015, 17: 20.
- [16] Murphy A B, Tam E. Thermodynamic properties and transport coefficients of arc lamp plasmas: argon, krypton and xenon [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2014, 47: 295202.
- [17] Murphy A B. Transport coefficient of plasmas in mixtures of nitrogen and hydrogen [J]. *Chem Phys*, 2012, 398: 64.
- [18] Chen B, Wang H B, Wei J J, *et al.* Investigation of hydrogen plasma and its irradiation behavior on tungsten [J]. *J Sichuan Univ(Nat Sci Ed)*, 2021, 58: 054001. [陈波, 王宏彬, 韦建军, 等. 氢等离子体特性及其对钨的辐照行为研究 [J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2021, 58: 054001.]