中国科学: 技术科学 2023 年 第 53 卷 第 11 期: 1953 ~ 1961
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

超声分子束束流特性实验研究

殷娇[1], 肖国梁[1], 陈程远[1], 冯北滨[1], 朱毅仁[1], 薛冠群[1,2], 张轶泼[1], 聂林[1], 石中兵[1], 钟武律[1*]

1. 核工业西南物理研究院, 成都 610225;
2. 大连理工大学物理学院, 大连 116081
* E-mail: zhongwl@swip.ac.cn

收稿日期: 2022-10-11; 接受日期: 2022-12-26; 网络版发表日期: 2023-08-21
国家重点研发计划(编号: 2022YFE03060001)和国家自然科学基金(批准号: U21A20440和12105086)资助项目

摘要 超声分子束注入(supersonic molecular beam injection, SMBI)是磁约束核聚变装置中的一种等离子体加料技术. 为进一步优化SMBI束流特性、提升SMBI加料性能, 本文利用纹影诊断系统开展了不同工况下的注入器测试实验, 并对束流特性参数依赖性开展了研究. 研究结果表明, 束流寂静区长度(又称束流注入有效距离)与束流发散半角依赖于系统工况及注入器特征参数, 且本文给出了束流特性参数的定量变化规律. 此外, 普通圆孔注入器与自研一体式注入器的对比测试结果表明, 自研的一体式注入器在束流注入有效距离和束流聚束性能上均优于普通圆孔注入器. 该研究工作为不同磁约束核聚变装置上的超声分子束注入器设计和束流优化提供了数据支撑和参考.

关键词 超声分子束注入, 纹影, 注入器, 束流测量

1 引言

在磁约束核聚变装置中, 弹丸注入(pellet injection, PI)[1]、普通送气(gas puffing, GP)[2]以及超声分子束注入(supersonic molecular beam injection, SMBI)[3]是三种常用的加料方式. 超声分子束注入技术是由核工业西南物理研究院原创的磁约束核聚变加料技术, 用于核聚变装置等离子体加料以及物理实验研究已达20余年. 相较于普通送气, 超声分子束注入具有加料效率更高、注入深度更深、更好的区域定向能力以及能实现较低的气壁再循环率等优势; 而相较于弹丸注入, 超声分子束注入具有系统简单灵活、加料种类广泛等特点. 上述结论已在HL-2A[4]、EAST[5]、Tore Supra[6]、JT-60U[7]等装置上得到了实验验证. 基于以上特点和优势, SMBI已在国内外多个磁约束聚变实验装置上得到应用. 为进一步提升SMBI性能、探索高效加料及有效控制粒子再循环、深入开展物理实验和数值模拟研究、发展适用于聚变装置不同应用场景的SMBI技术, 需对超声分子束束流进行直接测量, 并系统研究束流特性. SMBI束流测试的主要目的是测量不同气源压强、背景压强、注入器结构等参数下的分子束束流特性与物理参数分布, 通过定量分析得出影响束流特性

引用格式: 殷娇, 肖国梁, 陈程远, 等. 超声分子束束流特性实验研究. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1953–1961
Yin J, Xiao G L, Chen C Y, et al. Experimental study on the characteristics of supersonic molecular beam injection (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1953–1961, doi: 10.1360/SST-2022-0328

© 2023 《中国科学》杂志社

的关键因素，用以研制不同需求的新型SMBI注入器，为更好地开展聚变装置上超声分子束束流与等离子相互作用的研究提供数据支撑.

本文开展的束流测试实验主要是利用纹影仪系统开展[8]. 纹影法是基于光的折射原理. 由于光在不均匀被测流场中折射率梯度正比于流场密度[9]，因此，纹影法可将肉眼不可见的密度变化转变为可直接观测的光强变化，该方法已广泛应用于多学科领域[10]. 图1给出的是本文中用于测量的“Z”字型纹影系统的布局图. 该系统中，球面反射镜焦距为2.5 m，系统有效通光口径为150 mm，超高速相机的时间分辨可达10 μs，能够观测到SMBI在高真空背景下束流形成过程及束流形貌.

本研究利用SMBI测试平台，采用纹影诊断方法对一系列具有不同结构参数的注入器开展了束流测试实验. 通过对实验结果的定量分析，给出了束流寂静区长度X_{M}、束流发散半角α与气源气压P_0、背景压强P_{b}以及注入器结构等参数之间的影响规律. 本文第2部分主要介绍了束流寂静区长度X_{M}与压强之间的关系，并对比了普通圆孔注入器、自研一体式注入器的束流寂静区长度与经验公式值之间的差异; 第3部分主要介绍了束流的发散半角α与压强以及注入器关键结构参数之间的关系，并获得了束流发散半角α与各影响因子之间的定标关系式；最后，第4部分是对本文研究工作的总结.

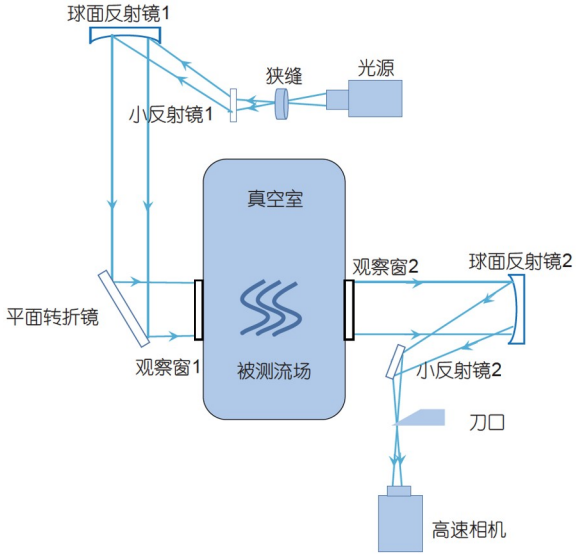


图 1 (网络版彩图)纹影系统布局图

Figure 1 (Color online) The diagram of the schlieren system.

2 超声分子束寂静区长度特性分析

2.1 注入器结构

用于测试的普通圆孔型注入器和自研一体式锥形注入器的结构剖面图如图2(a)所示. 由图可知，一体式注入器较圆孔注入器在结构上增加了扩张段，更加接近标准拉瓦尔(Laval)喷嘴[11]的结构. 另外，通过束流优化数值模拟结果，并基于注入器的结构特征，我们加工了具有不同注入器的角度θ、扩张段长度L以及喉道直径d等结构参数的一体式注入器，实物如图2(b)和(c)所示. 本文中，一体式注入器的名称主要根据其两个关键参数——锥角角度θ及扩张段长度L命名: 23 mm-10°代表扩张段长度为23 mm，锥角角度为10°的一体式锥形注入器，下文中将不再赘述.

2.2 寂静区长度特征及测量方法

具有一定压力P_0的气体在经过拉瓦尔喷嘴注入到本底压力为P_{b}的更低压力或真空区域时，会在喷嘴出口处经膨胀形成等熵区，即无激波寂静区[12]，其结构如图3(a)所示. 寂静区中马赫数大于1，其轴向长度代表超声分子束注入的有效距离. 分子束束流能否在进入等离子体时保持高的定向运动速度，对其在核聚变装置等离子体中的加料深度及加料效率有重要影响. 因此，寂静区长度X_{M}是衡量SMBI注入器的重要特性参数之一. 研究表明，超声束流的寂静区长度X_{M}可以通过式(1)计算给出，其中d代表喷嘴的喉道直径，该式中P_0/P_{b}的适用范围为5~17000[13].

$$\frac{X_{\mathrm{M}}}{d}=0.67\sqrt{\frac{p_0}{p_{\mathrm{b}}}}. \tag{1}$$

纹影实验条件如下：高速相机采样率为7000 fps，注入气体为CO_2，束流脉宽为40 ms. 寂静区长度测量均使用喉道直径d为1 mm的注入器. 图3(b)和(c)分别为圆孔和23 mm-10°的注入器得到的超声分子束束流纹影测试图. 图中的压强条件如下：气体压强P_0=5×10^6 Pa，背景压强P_{b}=1000 Pa. 纹影图中颜色值代表束流注入后光强度值(I)减去初始背景强度值(I_0)得到的光强度变化量(ΔI). 寂静区长度X_{M}是通过计算束流横向中轴线上的光强度变化值曲线，对应于光强度最高点和最低点之间的距离.

2.3 寂静区长度X_{M}与气源压强P_0的关系

为研究压强对寂静区长度X_{M}的影响关系，本文利

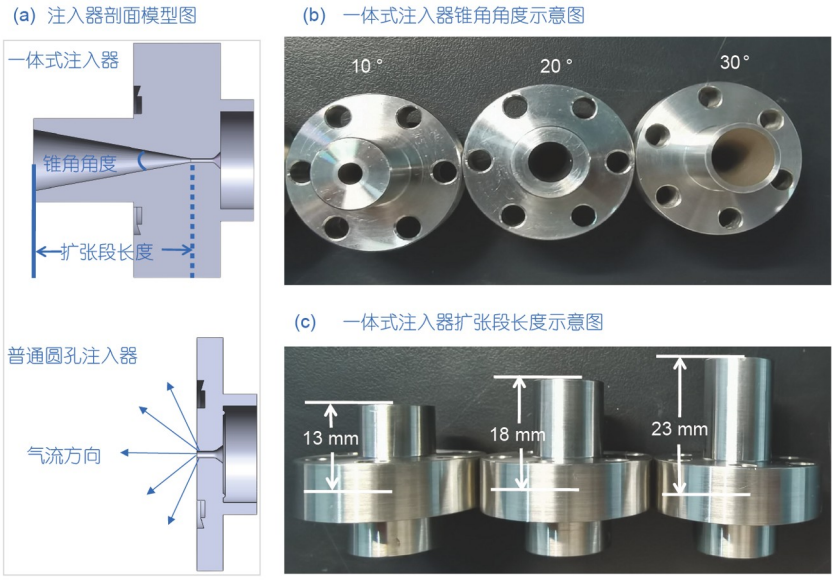


图 2　(网络版彩图) (a) 注入器剖面模型图; (b) 锥角角度示意图; (c) 扩张段长度示意图

Figure 2　(Color online) (a) Cross-section of the injector; (b) the schematic of the cone angle; (c) the schematic of the expansion segment length.

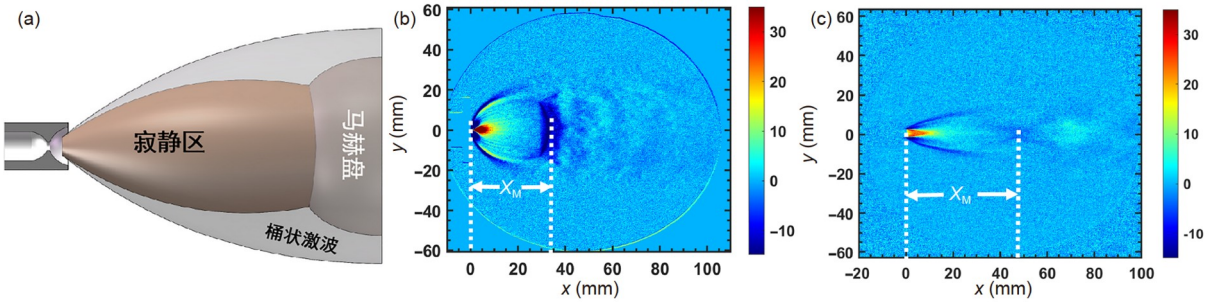


图 3　(网络版彩图) (a) 超声束流模型图; (b) 1 mm圆孔注入器纹影测试图; (c) 1 mm一体式注入器纹影测试图

Figure 3　(Color online) (a) The theoretical diagram of the supersonic beam; (b) the measured schlieren image of the 1 mm round hole injector; (c) the measured schlieren image of the 1 mm integrated injector.

用圆孔注入器采用压强扫描的方法开展了实验研究. 图4给出了寂静区长度X_M与气源压强P_0的关系. 图中圆点(P_b=100 Pa)、三角形(P_b=500 Pa)、正方形(P_b=1000 Pa)、菱形(P_b=10000 Pa)为不同气压P_0下得出的X_M实测值, 虚线为拟合值. 其中, 背压P_b为100 Pa、气压P_0为4×10^6和5×10^6 Pa时, 寂静区长度超出纹影系统观察窗可视范围无法计算. 从图4中可以看出: 在背景压强P_b不变, 气源压强P_0不断提升的情况下, 寂静区长度X_M也随之不断增长; 在相同气源压强P_0下, 背景压强P_b越高, 寂静区长度X_M越短. 通过数据拟合, 进一步证明了该结果与式(1)中表述的关系吻合.

2.4　寂静区长度X_M与背景压强P_b的关系

对气源压强P_0为4×10^6 Pa (正方形)、2×10^6 Pa (圆点)、5×10^5 Pa (菱形)时扫描背景压强P_b得到的寂静区长度X_M实测值进行了数据分析, 得到图5中的关系, 图中虚线为拟合值. 从图5中可以看出: 在气源压强P_0不变, 背景压强P_b不断提升的情况下, 寂静区长度X_M随之不断减小; 在相同背景压强P_b下, 气源压强P_0越高, 寂静区长度X_M越长. 通过数据拟合, 进一步证明了该结果与式(1)中表述的关系吻合.

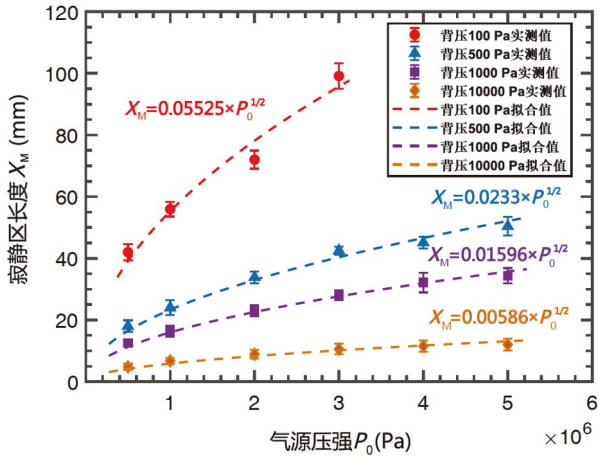


图 4 (网络版彩图)圆孔注入器束流寂静区长度X_M与气源压强P_0的关系图

Figure 4 (Color online) Diagram between the silence zone length X_M of the round hole injector and the pressure of the air source P_0.

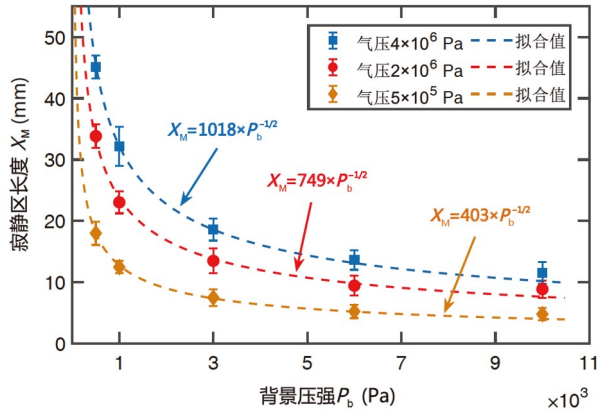


图 5 (网络版彩图)圆孔注入器束流寂静区长度X_M与背景压强P_b的关系图

Figure 5 (Color online) Diagram between the silence zone length X_M of the round hole injector and the pressure of the background P_b.

2.5 不同类型注入器形成的寂静区长度X_M与压强比P_0/P_b的关系

从2.3和2.4节的研究结果可知，寂静区长度X_M与气源压强P_0正相关，与背景压强P_b负相关，由此可知，寂静区长度X_M应与压强比P_0/P_b正相关. 此外，为确认圆孔注入器以及自研一体式锥形注入器与式(1)值的差异性，本文对一体式注入器的寂静区长度进行了分析. 图6给出了压强比P_0/P_b与寂静区长度X_M之间的关系. 图中圆点为23 mm-10°一体式注入器的X_M实测值，点划线为拟合值；正方形为圆孔注入器的X_M实测值，

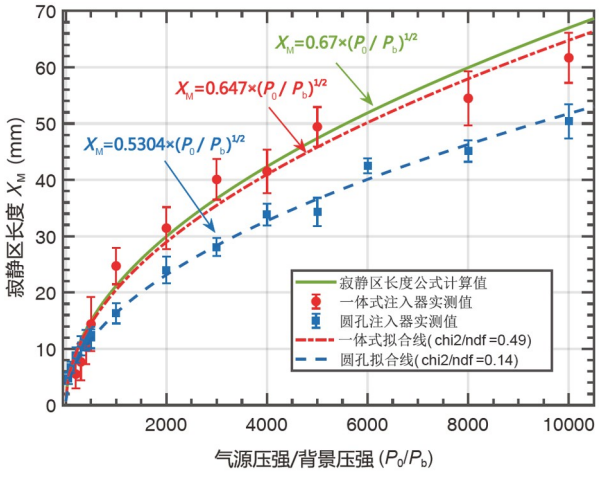


图 6 (网络版彩图)不同类型注入器寂静区长度X_M与压强比P_0/P_b关系图

Figure 6 (Color online) Diagram between the silence zone lengths X_M of different types of injector and the pressure ratio P_0/P_b.

虚线为拟合值；实线为X_M经验公式(1)的计算值曲线；chi2/ndf(卡方检验值/自由度)表示实测值与拟合值之间的偏离程度.

图6所得结果与前述实验现象及理论预测一致，无论是普通圆孔类型注入器还是一体式锥形注入器，纹影测量出的寂静区长度X_M与P_0/P_b均呈正相关趋势. 另外，现有实验结果显示，参数为23 mm-10°的一体式注入器形成的束流寂静区长度与式(1)更加接近，其在注入有效距离方面优于普通圆孔注入器. 该结果意味着，由于普通圆孔注入器结构缺少扩散段导致气体处于欠膨胀状态，即气体内能没有最大限度的转变成束流定向流动的动能，从而导致束流有效距离较小；因此，对比结果可知，23 mm-10°一体式锥形注入器比普通圆孔注入器更加适用于具有较大空间距离的托卡马克等离子体加料应用.

3 超声分子束束流发散半角特性分析

3.1 束流发散半角计算方法

为优化注入器结构以提高超声分子束束流聚束能力，对加工的不同类型的注入器进行了束流发散半角特性分析. 束流发散特性以束流发散半角α表示. 以圆孔注入器纹影测试图为例，其计算方法如下：如图7(a)所示，以出口处束流边界处为起点，在束流轮廓边界线上取斜率最大点为终点，在这两点之间共取10个像素

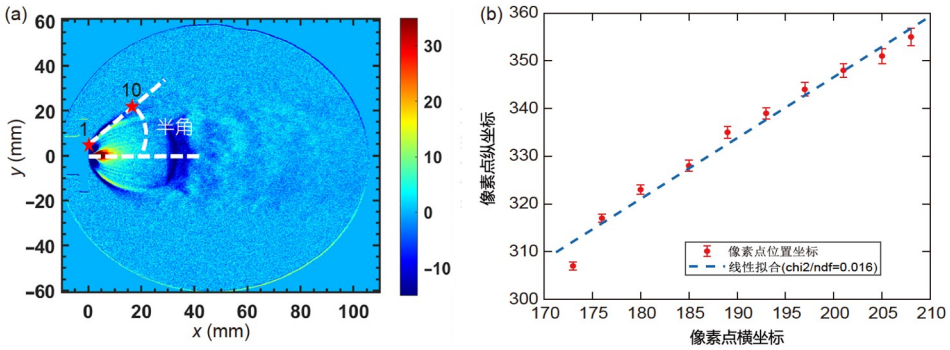


图 7　(网络版彩图) (a) 圆孔注入器束流发散半角纹影示意图; (b) 束流发散半角计算示意图

Figure 7　(Color online) (a) The half angle schlieren schematic of the hole injector beam; (b) schematic diagram of the half angle of the beam.

点位, 并利用这10个像素点的位置坐标值线性拟合, 如图7(b)所示, 通过直线的斜率来计算束流发散半角. 故下文中所有角度均为束流发散半角, 其误差由斜率误差通过误差传递而得到.

3.2　压强与束流发散半角α的关系

3.2.1　气源压强P_0与束流发散半角α的关系

为研究压强与束流发散半角α之间的关系, 本文采用压强扫描的方法对圆孔注入器开展了束流发散半角数据分析. 图8给出了气源压强P_0与束流发散半角α的关系. 图中, 圆点、正方形、三角形、星号分别表示背景气压P_b为500, 1000, 3000和6000 Pa时得出的α实测值, 虚线为拟合值. 从图8中可以看出: 在相同的气源压强P_0下, 背景压强P_b越小, 束流发散半角α越大; 在相同的背景压强P_b下, 气源压强P_0越大, 束流发散半角α越大. 通过数据拟合进一步验证了束流发散半角α与气源压强P_0为正相关关系.

3.2.2　背景压强P_b与束流发散半角α的关系

对气源压强P_0为4×10^6 Pa (圆点)、3×10^6 Pa (正方形)、2×10^6 Pa (三角形)、1×10^6 Pa (菱形)时扫描背景压强P_b得到的束流发散半角α实测值进行了数据分析, 得到了如图9所示的关系, 图中虚线为拟合值. 分析结果显示: 在相同的背景压强P_b下, 气源压强P_0越大, 束流发散半角α越大; 在相同的气源压强P_0下, 背景压强P_b越小, 束流发散半角α越大. 另外, 随着背景压强逐渐

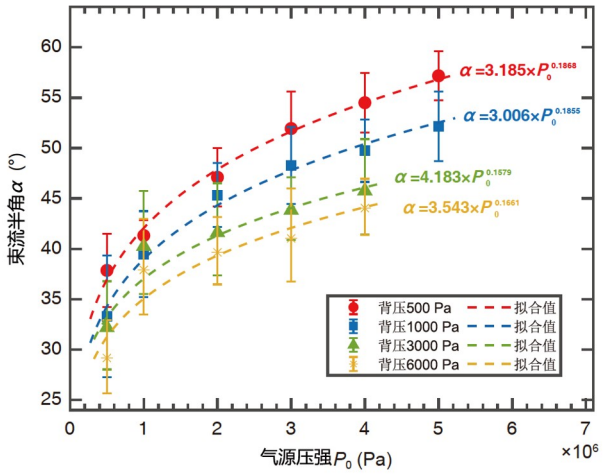


图 8　(网络版彩图)圆孔注入器束流发散半角α与气源压强P_0的关系图

Figure 8　(Color online) The diagram between the beam half angle α of the round hole injector and the air pressure P_0.

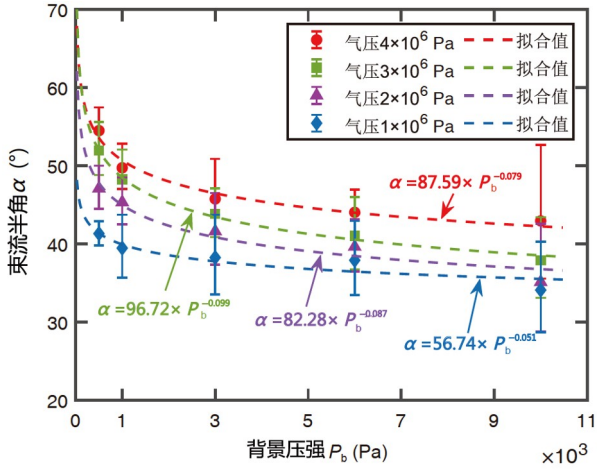


图 9　(网络版彩图)圆孔注入器束流发散半角α与背景压强P_b的关系图

Figure 9　(Color online) The diagram between the beam half angle α of the round hole injector and the background pressure P_b.

增大, 超声分子束束流的轮廓逐渐变小, 从而导致束流半角计算误差也随之增大. 通过数据拟合进一步验证了束流发散半角α与背景压强P_b为负相关关系.

3.2.3 压强比P_0/P_b与束流发散半角α的关系

从3.2.1, 3.2.2节的研究结果可知, 束流发散半角α与气源压强P_0呈正相关, 与背景压强P_b呈负相关, 由此可知束流发散半角α与压强比P_0/P_b正相关. 此外, 本文对比了不同类型注入器的聚束性能差异. 基于现有实验结果, 图10给出了圆孔注入器和23 mm-10°一体式注入器在不同压强比P_0/P_b下束流发散半角α的演化. 图中, 圆形表示圆孔注入器的实测值, 虚线为拟合值; 菱形表示一体式注入器的实测值, 点划线为拟合值. 从图10中可以看出: 无论是圆孔类型注入器还是一体式锥形注入器, 压强比P_0/P_b越大, 束流发散半角α越大; 通过数据拟合进一步验证了压强比与束流发散角之间呈正相关关系. 另外, 从图中明显可以看出, 该一体式锥形注入器形成的束流具有更小的束流发散半角, 即其聚束性能优于普通圆孔注入器.

3.3 注入器锥角角度θ与束流发散半角α的关系

采用相同工况下改变注入器单一结构参数进行束流发散半角α对比测试的方法来研究注入器结构参数对束流聚束性能的影响, 其中固定工况条件为: 气源压强P_0=5×10^6 Pa, 背景压强P_b=500 Pa.

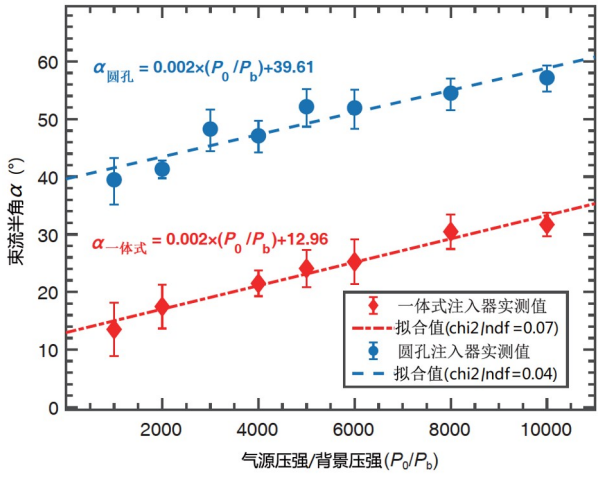


图 10 (网络版彩图)不同类型注入器束流发散半角α与压强比P_0/P_b的关系图

Figure 10 (Color online) The diagram between the beam half angles α of the different injectors and the pressure ratio P_0/P_b.

图11给出了一体式注入器锥角角度θ与束流发散半角α之间的关系. 注入器结构参数如下: 注入器锥角角度θ分别为10°, 20°, 30°(角度加工精度误差为±0.2°), 扩张段长度L=23 mm, 喉道直径d=1 mm. 从图11中可以看出: 不同锥角的一体式注入器形成的束流发散半角也不同. 本次测试的3个注入器中, 23 mm-30°的一体式锥形注入器在聚束性能方面表现最佳; 注入器角度θ与束流发散半角α呈负相关关系.

3.4 注入器扩张段长度L与束流发散半角α的关系

图12给出了注入器扩张段长度L与束流发散半角

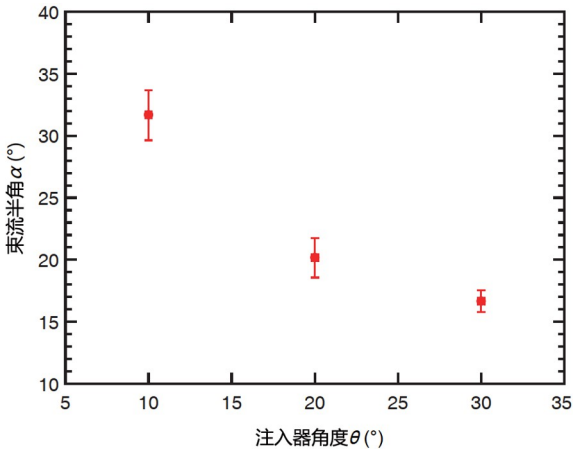


图 11 (网络版彩图)一体式注入器束流发散半角α与注入器角度θ的关系图

Figure 11 (Color online) The diagram between the beam half angle α of the integrated injector and the injector angle θ.

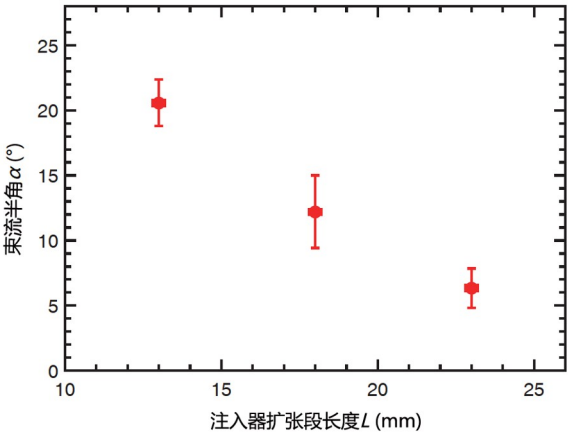


图 12 (网络版彩图)一体式注入器束流发散半角α与扩张段长度L的关系图

Figure 12 (Color online) The diagram between the beam half angle α of the integrated injector and the expand length L.

α的关系. 注入器结构参数如下: 扩张段长度L分别为13, 18, 23 mm(长度加工精度误差为±0.15 mm), 喉道直径d=0.25 mm, 注入器角度θ=20°. 从图12中可以看出: 不同扩张段长度的一体式注入器形成的束流发散半角α也不同. 本次测试的3个注入器中, 扩张段长度L为13 mm的注入器束流发散角α明显大于其他两种注入器, L为23 mm的注入器半角角度α最小, 即扩张段长度L与束流发散半角α呈负相关关系.

3.5　注入器喉道直径d与束流发散半角α的关系

图13给出了注入器喉道直径d与束流发散半角α的关系. 注入器结构参数如下: 圆孔注入器喉道直径d分别为1和0.5 mm, 一体式锥形注入器的喉道d分别为1和0.25 mm(其余结构参数均相同), 喉道直径加工精度误差为±0.025 mm. 通过计算得到如图13所示的喉道直径与束流发散半角的关系. 图中, 圆点表示不同喉道直径d的圆孔注入器形成的束流发散半角α, 方块表示不同喉道直径d的一体式注入器形成的束流发散半角α.

从图13中可以看出: 不同喉道直径d的注入器形成的束流发散半角α不同. 喉道直径d越大束流发散半角α越大, 即喉道直径d与束流发散半角α两者之间呈正相关关系. 但是, 圆孔注入器喉道直径增大1倍, 束流发散半角角度仅增加约5°; 一体式锥形喉道直径增大4倍, 束流发散半角角度仅增大约10°, 即喉道直径大小对束流发散半角的影响程度不大.

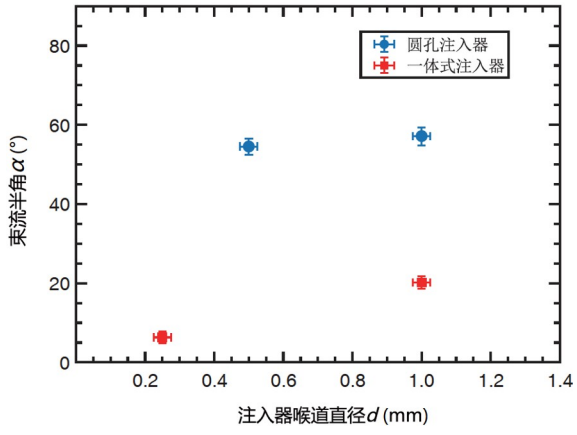


图 13　(网络版彩图)不同类型注入器束流发散半角α与喉道直径d的关系图

Figure 13　(Color online) The diagram between the beam half angles α of different injectors and the laryngeal diameter d.

3.6　各参数与束流发散半角α的定标关系

通过以上分析, 分别对影响束流聚束性能的几个因素: 气源压强P_0、背景压强P_b、注入器角度θ、注入器扩张段长度L、注入器喉道直径d与束流发散半角α之间的关系进行了定性研究. 为了明确束流发散半角α与各影响因素之间的定量关系, 本文统计了不同结构参数的注入器在不同压强下的束流发散半角数据, 并利用定标率方法对统计结果进行了分析研究, 得到了束流发散半角实测值与束流发散半角定标值的关系图, 如图14所示. 定标率关系式为

$$\alpha_{\text{scaling}} \propto d^{0.14} \times L^{-0.82} \times \theta^{-0.83} \times P_0^{0.20} \times P_b^{-0.08}.$$

从定标关系式可以看出: 喉道直径d、气源压强P_0与束流发散半角α呈正相关, 扩张段长度L、注入器角度θ、背景压强P_b与束流发散半角α呈负相关, 与前面实验分析结论一致. 另外, 图14中的数据拟合结果显示, 束流发散半角α的实测值与定标率值非常接近, 后续可通过该定标关系式, 预测不同结构参数的注入器在不同工况下的超声分子束束流发散半角. 该定标关系可对超声分子束注入器的设计和优化提供支撑.

4　结论

通过纹影诊断系统开展了SMBI束流特性测量实验以及参数依赖性研究工作, 并得到了束流特性的两个重要参数即寂静区长度、束流发散角与注入器结构

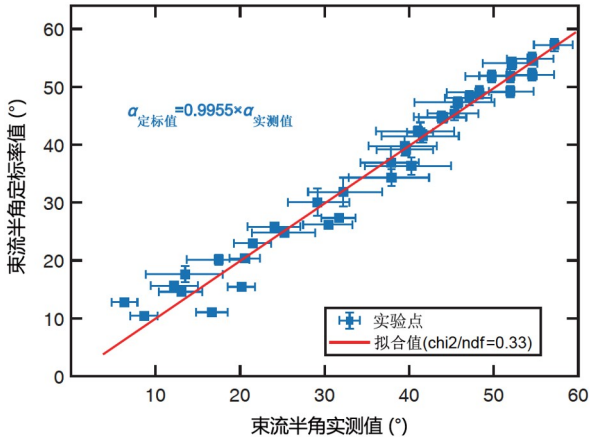


图 14　(网络版彩图)束流发散半角α定标率拟合图

Figure 14　(Color online) The calibration rate fitting diagram of the beam half-angle α.

参数及压强之间的依赖关系. 其中, 寂静区长度X_M与气源压强P_0呈正相关, 与背景压强P_b呈负相关. 束流发散半角α与气源压强P_0、P_0/P_b、喉道直径d呈正相关, 与背景压强P_b、注入器角度θ、扩张段长度L呈负相关; 并且, 通过定标率给出了现有实验条件下, 束流发散半角与上述影响因子之间的定标率计算关系式. 此外, 研究结果表明: 自研的一体式锥形注入器在束流注入有效距离和束流聚束性能上均优于普通圆孔注入器. 上述结果为不同应用需求的注入器束流特征参数优化提供了重要的实验数据支撑.

参考文献

1 Baylor L R, Jernigan T C, Combs S K, et al. Improved core fueling with high field side pellet injection in the DIII-D tokamak. Phys Plasmas, 2000, 7: 1878–1885

2 Sajjad S, Gao X, Ling B, et al. Effect of gas puffing on current ramp-down ohmic discharges in HT-7 tokamak. Phys Lett A, 2009, 373: 1133–1139

3 Yao L, Tang N, Cui Z, et al. Plasma behaviour with molecular beam injection in the HL-1M tokamak. Nucl Fusion, 1998, 38: 631–638

4 Yu D L, Chen C Y, Yao L H, et al. Study of the high fuelling efficiency features of supersonic molecular beam injection. Nucl Fusion, 2012, 52: 082001

5 Yuan X L, Li J G, Wu J H, et al. Development and implementation of supersonic molecular beam injection for EAST tokamak. Fusion Eng Des, 2018, 134: 62–67

6 Pégourié B, Tsitrone E, Dejarnac R, et al. Supersonic gas injection on Tore Supra. J Nucl Mater, 2003, 313-316: 539–542

7 Takenaga H, Miyo Y, Bucalossi J, et al. Fuelling characteristics of supersonic molecular beam injection in JT-60U. Nucl Fusion, 2010, 50: 115003

8 Yin J, Xiao G L, Chen C Y, et al. Development and applications of schlieren system for measuring characteristics of supersonic molecular beam (in Chinese). Acta Phys Sin, 2020, 69: 215202 [殷娇, 肖国梁, 陈程远, 等. 用于超声分子束束流特性测试的纹影系统研制及应用. 物理学报, 2020, 69: 215202]

9 Feng T Z, Liu C M, Zhao R X, et al. Schlieren methods: A review of techniques (in Chinese). J Ballistics, 1994, 2: 89–95 [冯天植, 刘成民, 赵润祥, 等. 纹影技术述评. 弹道学报, 1994, 2: 89–95]

10 Settles G S. Schlieren and Shadowgraph Techniques-Visualizing Phenomena in Transparent Media (in Chinese). Ye J F, Wen M, Xu X, et al., Trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 187–232 [塞特尔. 纹影与阴影技术. 叶继飞, 文明, 徐徐, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2001. 187–232]

11 Pan J S, Shan P. Fundamentals of Gas Dynamics (in Chinese). Revised Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2012 [潘锦珊, 单鹏. 气体动力学基础. 修订版. 北京: 国防工业出版社, 2012]

12 Yao L H, Feng B B, Feng Z. Effects of fuelling by using high-pressure supersonic molecular beam in the HL-1M tokamak (in Chinese). Acta Phys Sin, 2002, 51: 0596-07 [姚良骅, 冯北滨, 冯震. HL-1M装置高气压超声分子束加料效果. 物理学报, 2002, 51: 0596-07]

13 Ashkenas H, Sherman F S. Structure and utilization of supersonic free jets in low density wind tunnels. In: de Leeuw J H, ed. 4th Symposium on Rarefied Gas Dynamics. Vol. 2. New York: Academic Press, 1966

Experimental study on the characteristics of supersonic molecular beam injection

YIN Jiao[1], XIAO GuoLiang[1], CHEN ChengYuan[1], FENG BeiBin[1], ZHU YiRen[1], XUE GuanQun[1,2], ZHANG YiPo[1], NIE Lin[1], SHI ZhongBing[1] & ZHONG WuLyu[1]

[1] *Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China;*
[2] *School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China*

Supersonic molecular beam injection (SMBI) emerges as an efficient fueling method for magnetic fusion plasma. In this work, injector tests were performed under various working conditions using a schlieren diagnostic system. Additionally, the parameter dependence of beam characteristics was investigated to optimize the supersonic molecular beam's (SMB) characteristics and improve its fueling performance. The results show that the length of the zone of silence and the divergence angle of the beam is affected by system conditions and injector characteristic parameters. Besides, this paper provides the quantitative change law of the beam characteristic parameters. Furthermore, comparisons between the ordinary round-hole injector and the self-developed integrated injector reveal that the self-developed integrated injector outperforms the ordinary round-hole injector in terms of effective beam injection distance and beam aggregation performance. Therefore, this study creates a database and a reference for supersonic molecular beam injector design and beam optimization on various devices.

supersonic molecular beam injection, schlieren system, injector, beam profile measurement

doi: 10.1360/SST-2022-0328