

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.01.016

中性粒子标定源中聚焦系统的研究

付宏涛¹, 万林¹, 袁志凌¹, 汪超¹, 罗小兵¹, 臧临阁²

(1. 四川大学原子核科学技术研究所 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610065;

2. 核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘要: 设计了用于中性粒子标定源的聚焦系统. 利用三维电磁仿真软件 CST 对束流在中性粒子标定源中的输运情况进行了模拟, 研究了单透镜与加速管之间的距离、聚焦电压和加速电压的改变对束流轨迹的影响. 在离子源测试装置上利用塑料闪烁体对束流剖面进行了初步测定, 测试结果与模拟计算相符合. 文中得到的数据对中性粒子分析器的标定具有重要参考价值.

关键词: 中性粒子标定源; 聚焦系统; CST

中图分类号: TL99

文献标识码: A

文章编号: 0490-6756(2020)01-0118-05

Research on focusing system in the neutral particle calibration source

FU Hong-Tao¹, WAN Lin¹, YUAN Zhi-Ling¹, WANG Chao¹, LUO Xiao-Bing¹, ZANG Lin-Ge²

(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: A focusing system for neutral particle calibration source has been designed. Three dimensional electromagnetic simulation software CST has been used to simulate the transmission of the beam in the neutral particle calibration source. The distance between the single lens and the accelerating tube, as well as the influence on the focus voltage and the acceleration voltage on beam trajectory have been investigated. In addition, a plastic scintillator has been used to preliminary measure the profile of the beam flow on the ion source testing device. The experimental results are consistent with the simulation calculation, and our work has important reference value for the calibration of neutral particle analyzer.

Keywords: Neutral particle calibration source; Focusing system; CST

1 引言

在核聚变的研究中, 加热和约束等离子体, 使其产生有效的核聚变反应, 实现商用聚变反应堆是我们的目标. 因此, 研究离子在聚变等离子体中的行为十分重要. 中性粒子分析器是测量聚变等离子体离子能谱和质谱的重要工具, 它在磁约束聚变和惯性约束聚变研究中扮演着重要角色^[1].

核工业西南物理研究院设计了用于 HL₂A 装置上的中性粒子分析器, 而中性粒子分析器在使用前需要利用中性粒子标定源对其进行系统标定工作. 因此, 针对该分析器的参数要求, 我们展开了中性粒子标定源的设计工作, 其中聚焦系统是中性粒子标定源的重要组成部分, 因为它决定着束流的传输效率, 可以调节束流的焦点位置和焦斑大小. 在本工作中, 采用 CST 软件研究了束流在中性

收稿日期: 2018-11-02

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2013GB104002B); 国家自然科学基金(11505052)

作者简介: 付宏涛(1992-), 男, 硕士生, 主要从事核物理及核技术应用方面的研究.

通讯作者: 臧临阁. E-mail: zanglinge@swip.ac.cn

粒子标定源中的传输随聚焦系统各部件间的距离、电压的变化情况;利用离子源测试装置对束流剖面进行了初步的测定,并将实验结果与模拟数据进行了对比分析。

2 中性粒子标定源中聚焦系统的组成

中性粒子标定源主要由离子源、聚焦系统、中性化室等组成,其结构框图如图 1 所示. 聚焦系统由三部分组成,分别是单透镜、加速管(具有加速和聚焦作用)和电四极透镜。

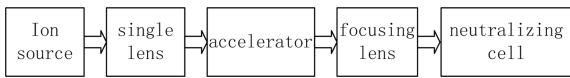


图 1 中性粒子标定源框图

Fig. 1 Flow diagram of the neutral particle calibration source

单透镜由 3 个等径等间距的圆筒电极组成,电极的内径 30 mm,间距 5 mm,其中,中间电极的长度为 10 mm,两端电极的长度均为 30 mm. 单透镜被广泛地应用于离子源的初聚系统中^[2],因为这种单透镜与空气中单独存在的光学透镜相似,透镜前后媒介的折射率相同,可以通过改变中间电极的电压来改变聚焦特性,同时又不影响和这一透镜相衔接的前后相邻透镜的特性。

我们设计的加速管为等梯度加速管,一共分为 6 节,每节长度 32 mm,内径 30 mm,可以承受 80 kV 的电压. 这种加速管在离子光学上是由入口和出口两个膜片透镜加上中间一段等电势梯度区组成的一个透镜系统,可以作为一个厚透镜来分析它的聚焦特性. 在聚焦系统中,加速管可以当作具有一定特性的离子光学元件,成为聚焦系统中的一个重要组成部分,将它和初聚系统的成象性质联合起来研究,就可以得到聚焦系统的匹配情况^[2-4]。

电四极透镜是一种具有面对称场分布的离子光学系统,适用于各种低能(低于 1 MeV)粒子的聚焦. 单一的电四极透镜能够实现离子束的线聚焦,双电四极透镜可以实现离子束的点聚焦^[5-8]. 本文设计的是双电四极透镜,透镜长度 20 mm,间距 10 mm,内径 30 mm,每两个电极之间的间隙 15°. 通过改变电四极透镜上的电压来对束流焦点的大小及位置进行调节。

3 模拟与测试分析

3.1 中性粒子标定源的聚焦模拟

三维电磁仿真软件 CST 是由总部位于德国达姆斯塔特市的全球最大的电磁场仿真软件公司 CST 出品的,是面向 3D 电磁、电路设计者的一款全面、精确的专业仿真软件. 软件覆盖整个电磁频段,包含粒子工作室等八个子软件,并且集成在同一个用户界面内,能够提供完整的部件级和系统级的仿真^[9]。

本文利用 CST 对中性粒子标定源的聚焦系统进行了建模,针对不同的极板间距、极板电压进行了仿真,通过分析确定不同参数的改变对束流传输的影响. 图 2 是中性粒子标定源的仿真模型,A 是离子源的引出电极,B 是单透镜的中间聚焦电极,C 是加速管电极,D 是电四极透镜电极;其电压分别为 U_i (引出电压)、 U (聚焦电压)、 U_c (加速电压)和 U_d (四极透镜电压), d 是单透镜与加速管之间的距离。

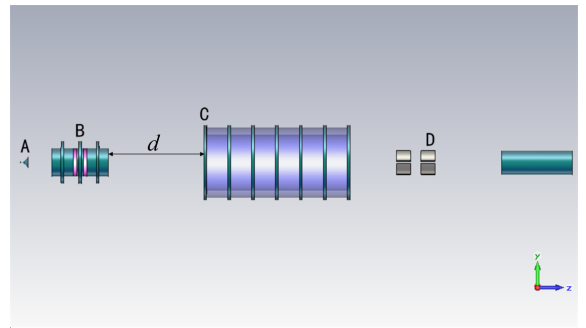


图 2 中性粒子标定源模型

Fig. 2 Model of neutral particle calibration source

3.1.1 间距 d 的选取 在聚焦系统中,对单透镜的要求首先就是满足和加速管的匹配,即单透镜的象点与加速管要求的物点重合. 由模拟发现,在取引出电压 $U_i=1.5$ kV 时,为了保证束流有较好的聚焦效果,聚焦电压 U 不能低于 1 kV,此时束流在距离单透镜出口 200 mm 处形成直径为 7.2 mm 的焦斑;随着电压 U 的增大,焦点会向 B 靠近,焦斑也在逐渐减小,当电压 U 增大到 2 kV 时,束流会聚焦在单透镜出口处,此时焦斑的直径为 2 mm. 关于在加速管各种电压比下要求的物点位置,我们利用厄耳凯因的物点与象点的关系式^[2]进行了计算,由计算可得,加速管所要求的物点需要在距离加速管入口 15~80 mm 范围内移动. 因此,间距 d 需要在单透镜的象点和加速管要求的物点的移动

范围内选取,即间距 d 在 $80\sim 215$ mm 范围内选取. 本文利用 CST 软件模拟了在不同间距 d 的情况下束流在聚焦系统中的传输情况(如图 3 所示),并考虑设备之间的连接等因素确定了间距 $d=140$ mm.

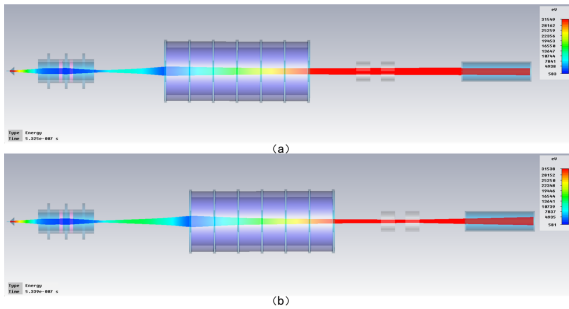


图 3 束流传输与距离 d 的关系:(a) $d=100$ mm;
(b) $d=140$ mm

Fig. 3 Beam transmission versus the distance d : (a) $d=100$ mm; (b) $d=140$ mm

3.1.2 电压 U 、 U_c 的改变对束流传输的影响 加速管的成象性质是由出射离子能量与入射离子能量的比值所确定的,而出射离子的能量是由加速电压 U_c 决定的;当电压 U_c 改变时会影响加速管的聚焦特性,此时为了使束流得到良好的传输,就需要对聚焦电压 U 和加速电压 U_c 做相应的调节. 例如在取引出电压 $U_i=1.5$ kV、电压 $U=1.4$ kV 时,通过调节电压 U_c 发现,当电压 $U_c=24$ kV 时,束流会在距离加速管出口 400 mm 处形成 8.8 mm 的焦斑,随着电压 U_c 的增大,焦点会向加速管出口靠近,焦斑也会逐渐减小;当电压 U_c 增大到 40 kV 时,束流会聚焦在加速管出口处,此时焦斑大小为 3.2 mm. 再继续增大电压 U_c ,束流将会聚焦在加速管内,为了使束流得到良好的传输,需要相应的提高入射离子的能量,即增大电压 U_i .

在研究聚焦电压 U 的改变对束流传输的影响时,取间距 $d=140$ mm、引出电压 $U_i=1.5$ kV、加速电压 $U_c=30$ kV、四极透镜电压 $U_d=0$ V,通过改变电压 U ,观察束流的传输情况. 如图 4 所示,是电压 U 为 1 和 1.5 kV 时的仿真结果,从图中可以看出电压 U 的改变对束流传输的影响很明显. 经过大量仿真发现,当电压 $U=0.9$ kV 时,束流在距离加速管出口 400 mm 处形成 9.5 mm 的焦斑,随着电压 U 的增大,焦点向加速管出口靠近,焦斑也逐渐减小,当电压 U 增大到 1.8 kV 时,束流在加速管出口处形成 3.8 mm 的焦斑.

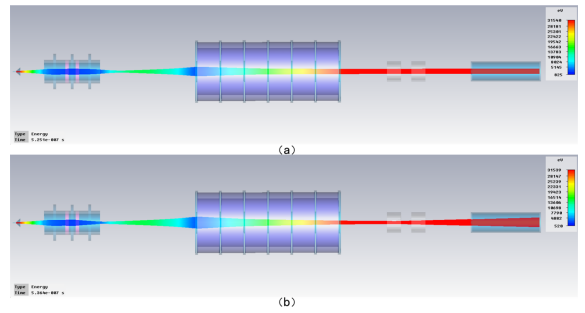


图 4 束流传输与电压 U 的关系:(a) $U=1$ kV;
(b) $U=1.5$ kV

Fig. 4 Beam transmission versus the voltage U : (a) $U=1$ kV; (b) $U=1.5$ kV

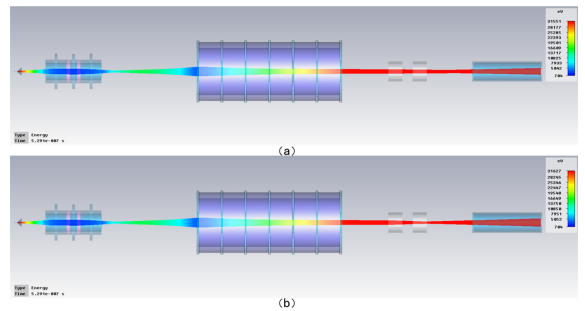


图 5 束流传输与电压 U_d 的关系:(a) $U_d=1$ kV;
(b) $U_d=3$ kV

Fig. 5 Beam transmission versus the voltage U_d : (a) $U_d=1$ kV; (b) $U_d=3$ kV

3.1.3 电压 U_d 的改变对束流传输的影响 为了对从加速管中引出的束流进行再次聚焦,我们在加速管与中性化室之间设置了电四极透镜,通过改变四极透镜电压 U_d 对束流焦点的位置和焦斑大小进行调节,从而使束流可以良好的输运到中性化室. 考虑到加速管出射束流的焦点位置及设备之间的连接等因素,当取电四极透镜与加速管出口的距离为 400 mm 时,由模拟发现能够满足在大多数的加速电压下对束流具有良好的聚焦.

在仿真四极透镜电压 U_d 的改变对束流传输的影响时,取间距 $d=140$ mm、引出电压 $U_i=1.5$ kV、聚焦电压 $U=1.2$ kV 和加速电压 $U_c=30$ kV,只改变电压 U_d ,观察束流传输的变化情况(如图 5 所示). 由模拟发现,当电压 U_d 低于 1.2 kV 时,束流的聚焦效果不太明显;当 $U_d=1.2$ kV 时,束流在距离电四极透镜 500 mm 处形成 6.2 mm 的焦斑;当电压 U_d 增大到 2 kV 时,束流能够在距离透镜 420 mm 处形成 2 mm 的焦斑;再继续增大电压 U_d ,焦点继续向透镜靠近,但是焦斑会逐渐增大,当电压 U_d 增大到 5 kV 时,束流能够在距离透镜 70 mm 处形成 9.2 mm 的焦斑. 此外,当电压 U_i 、

U 、 U_c 变化时, 通过电压 U_d 的调节, 束流的焦点位置和焦斑大小的变化范围基本不变。

3.1.4 束斑直径 R 与电压 U 的关系 为了将模拟数据与实验结果进行对比, 我们对单透镜中束流直径 R 随聚焦电压 U 的变化进行了模拟。在模拟过程中, 取引出电压 $U_i=3$ kV, 电压 U 为 2.8~3.5 kV (主要在束径变化的拐点附近取值), 单透镜两端电极的电压均为零, 通过调节电压 U 来观察束斑的变化情况。为了准确地获得束斑的大小, 在距离单透镜 80 mm 处设置了探测面。

图 6 是引出电压 $U_i=3$ kV 时束斑直径 R 随聚焦电压 U 的变化关系。从图中可以看出, 随着电压 U 的不断增大, 测得的束斑大小是先减小后增大; 这说明开始时电压 U 较小, 束流处于弱聚焦状态, 随着电压 U 的不断增大, 束流逐渐达到最佳聚焦状态, 此后再增大电压 U , 束流就会产生过聚焦而变成发散状态。

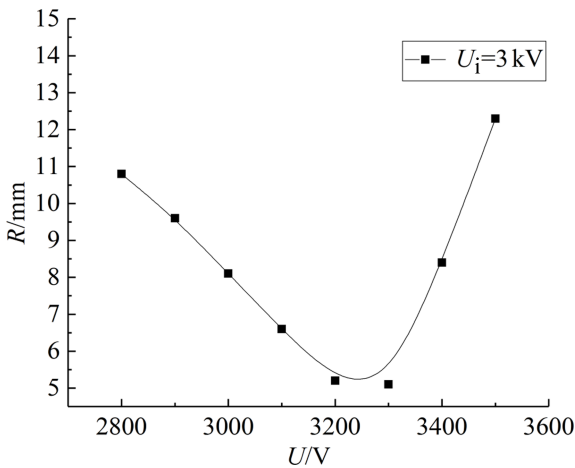


图 6 束径 R 与电压 U 的关系

Fig. 6 Beam diameter R versus the voltage U

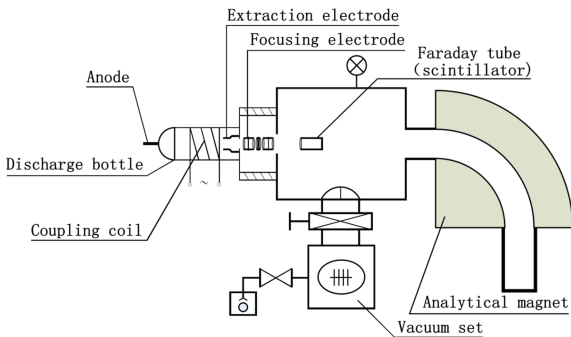


图 7 离子源测试装置示意图

Fig. 7 Configuration of the ion source test device

3.2 单透镜聚焦测试

为了验证模拟数据的可靠性, 在离子源测试装

置上对引出束流的剖面进行了测定, 离子源测试装置主要由离子源、单透镜、偏转磁铁等组成, 如图 7 所示。实验利用了超薄塑料闪烁体吸收高能粒子或射线后能够发光的特性对单透镜的聚焦情况进行了测试, 采用的塑料闪烁体是边长为 30 mm 的正方形, 厚度为 0.025 mm, 闪烁体置于距离单透镜 80 mm 处。

在实验过程中, 取引出电压 $U_i=3$ kV, 通过将聚焦电压 U 在 2.8~3.5 kV 范围内调节来观察束流的聚焦情况, 并利用相机记录了束斑的形状。如图 8 所示, 图 8(a)~(c) 是电压 $U_i=3$ kV 的引出束流分别在 2.9、3.2 和 3.4 kV 聚焦电压下打到塑料闪烁体上的发光情况。

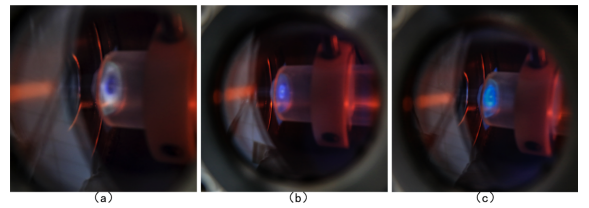


图 8 束流的聚焦图像: (a) $U_i=3$ kV, $U=2.9$ kV; (b) $U_i=3$ kV, $U=3.2$ kV; (c) $U_i=3$ kV, $U=3.4$ kV

Fig. 8 Photograph of focusing beam: (a) $U_i=3$ kV, $U=2.9$ kV; (b) $U_i=3$ kV, $U=3.2$ kV; (c) $U_i=3$ kV, $U=3.4$ kV

从图 8 中可以看出束流具有明显的聚焦。由图 6 中的模拟结果可知, 电压 $U_i=3$ kV 的引出束流在 2.9、3.2 和 3.4 kV 的聚焦电压下分别可以得到 R 为 9.6、5.2 和 8.3 mm 的束斑。通过将图 8 中的束斑图像与图 6 中的模拟数据进行对比, 发现实验结果与模拟数据吻合较好, 表明模拟计算是可靠的。

4 结论

研究设计了用于中性粒子标定源的聚焦系统。采用 CST 软件构建了聚焦系统的仿真模型, 模拟了束流在聚焦系统中的传输情况, 仿真结果表明: 通过对引出电压 U_i 、聚焦电压 U 、加速电压 U_c 和四极透镜电压 U_d 的调节, 可以使束流焦点在距离电四极透镜较大的范围内调节, 且最小能够得到直径为 2 mm 的焦斑, 能够满足中性粒子标定工作的要求 (5 mm)。利用离子源测试装置对束流剖面进行了初步测定, 实验结果验证了模拟计算的数据是正确可靠的。

参考文献:

- [1] 项志遯, 余昌旋. 高温等离子体诊断技术: 下册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [2] 叶铭汉, 陈监璞. 静电加速器[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [3] 张华顺, 万春侯. 离子源和大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
- [4] 祖秀兰, 娄本超, 李艳, 等. 高频离子源的光学设计[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32: 172.
- [5] Baranova L A, Read F H. Aberrations caused by mechanical misalignments in electrostatic quadrupole lens systems [J]. *Optik*, 2001, 112: 131.
- [6] Baranova L A, Read F H. Minimisation of the aberrations of electrostatic lens systems composed of quadrupole and octupole lenses [J]. *Int J Mass spectrom*, 1999, 189: 19.
- [7] Matyshev A A. Ion focusing properties of an isotrajectory quadrupole lens pair [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 1999, 427: 288.
- [8] Lu C S, Howarde E C. Electrostatic quadrupole lens pair for mass spectrometers [J]. *Rev Sci Instrum*, 1962, 33: 823.
- [9] 王翠, 乔双. 中子管用三电极离子聚焦系统的仿真研究[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2016, 48: 99.

引用本文格式:

- 中文: 付宏涛, 万林, 袁志凌, 等. 中性粒子标定源中聚焦系统的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 118.
- 英文: Fu H T, Wan L, Yuan Z L, *et al.* Research on focusing system in the neutral particle calibration source [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2020, 57: 118.