

# HL-2A 中性束大功率离子源的研制

雷光玖<sup>1)</sup> 姜韶凤 钟光武 曹建勇 卢大伦 邹桂清 刘鹤 张贤明 江涛  
杨继芳 钱家湄 唐立新 周才品 毛维成 刘永

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

**摘要** 2007年3月,为HL-2A中性束注入器研制的大功率离子源在核工业西南物理研究院成功通过了测试.该离子源为圆柱结构的桶式离子源型;加速器采用三电极的加减速系统.实验运行参数如下:灯丝加热电流1100A,电压12V,弧放电电压120V,弧放电电流1050A,等离子体密度达 $2.5 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ,离子流密度 $0.44\text{A}/\text{cm}^2$ ;在距等离子体电极5mm的平面上,等离子体的均匀性好于5%,工作脉宽2s.离子源物理设计、工程考虑、实验研究结果等将在本文介绍.

**关键词** 离子源 中性束注入器 等离子体加热

## 1 引言

中性束注入技术是聚变研究中二级强功率加热的主要手段,同时在聚变研究中中性束注入是电流驱动、控制等离子体分布、改善约束的主要手段之一<sup>[1, 2]</sup>. HL-2A中性束注入器系统由两条中性束线组成,总注入中性束功率为3MW,离子能量45—55keV,脉宽2s,是中国HL-2A装置上的主要等离子体加热装置之一.

从离子源物理设计、计算模拟、工程设计、加工、调试、优化等,到最终达到设计要求,历经了近两年时间<sup>[3, 4]</sup>.在研制的过程中,对磁场位形设计、灯丝电流分布、以及工程上的几大问题上作了改进和调整<sup>[5, 6]</sup>.从测试和使用结果看,该离子源的等离子体密度、等离子体密度的均匀性、放电的稳定性等都完全达到了设计的要求.

## 2 离子源设计考虑

设计大功率离子源涉及到离子源的结构、送气设计、磁场位形计算、阴极设计、弧电流计算、等离子体密度估计、等离子体鞘层估计、反流电子计算和处理、质子比考虑、等离子体初始电子考虑、离子束光学等物理问题<sup>[3, 4]</sup>,同时也涉及到离子源部件的结构、冷却、绝缘、真空等工程问题.详细的设计和计算已经超出了本文的范围,在此只对设计中的几个关

键问题进行简单讨论介绍.

### 2.1 离子源的设计参数

HL-2A中性束的离子源设计参数主要根据HL-2A Tokamak装置加热功率要求、注入窗口尺寸等要求提出.表1是HL-2A离子源的设计参数.

表1 离子源的设计指标

离子束功率 $P_{\text{ion}}$	1.0MW
离子束能量 $E_{\text{ion}}$	55keV
离子流强 $I_{\text{ion}}$	25A
束脉宽( $\tau_b$ )	2s
离子束引出面积	238cm <sup>2</sup>
等离子体密度均匀性	好于5%
气体效率	> 50%
引出离子流密度 $J_{\text{ion}}$	0.23A/cm <sup>3</sup>
等离子体密度	$2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$
加速电极的透明度	49%
工作气体	$H_2/D_2$

### 2.2 离子源结构

该离子源采用圆柱形桶式离子源结构,开口端为离子束引出面.图1是安装在在中性束线上的HL-2A大功率离子源.放电室直径260mm,高为240mm,离子束引出面积238cm<sup>2</sup>,放电室由不锈钢围成;条形Sm-Co磁铁均匀沿放电室外壁辐向排列,形成轴向会切,后背板上的磁铁按半放射状排列形成会切磁场位形约束等离子体;9条发夹形灯丝安装在后背板底座上,灯丝采用并联直流供电;送气口位于后背板的中央;放电室壁内设计了冷却水槽.

2008-01-07 收稿

1) E-mail: gjlei@swip.ac.cn

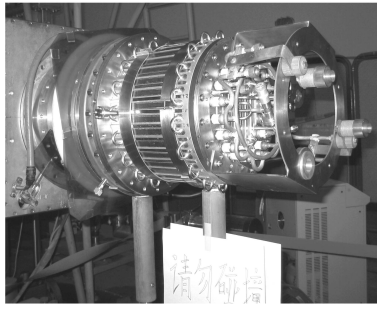


图1 HL-2A大功率离子源

### 2.3 磁场设计

为了满足建立高密度, 高均匀性等离子体的要求, 在设计和实验研究中, 模拟计算了多种磁体排列方式和灯丝的结构对在离子引出区边缘上的磁场波动, 磁场在引出死区的衰减, 离子引出区的角向磁场的影响, 最终得到了优化的磁场位形. 图2是在距离

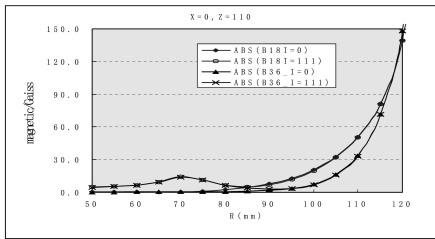


图2 用CST计算出的两种磁铁排列离子源的磁场模值径向分布

底部110mm的平面上, 两种磁体排列磁场的模值的径向分布. 可以看出第二种磁体排列方式, 磁场在引出死区的衰减快得多. 灯丝电流产生的磁场对该平面附近的磁场分布影响较大, 但在离子引出面附近很小.

### 2.4 灯丝考虑

所有的灯丝采用并联馈电. 由于各灯丝馈电连接方式和导电铜管的电阻, 造成了各灯丝的加热功率不均匀, 图3是原型离子源的灯丝馈电结构(功率不均匀性在8%左右)和改进后(功率的不均匀性为1.3%左右)离子源各灯丝上的电热功率分布情况. 灯丝的不均匀造成等离子体密度均匀性变坏, 同时会引起灯丝与放电室壁局部放电, 使弧电流急剧升高, 大大影响灯丝和放电室的寿命.

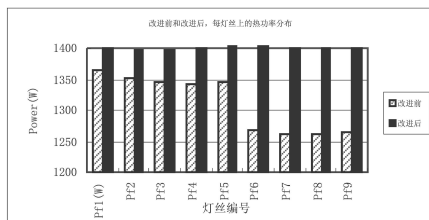


图3 原型和改进后灯丝上的功率分布

### 2.5 引出系统

离子源采用3个电极构成的加速减速系统. 电极材料为无氧铜, 电极采用特殊设计的惯性冷却方式, 保证了电极受热后变形量控制到最小.

## 3 实验结果

### 3.1 离子源实验参数

测试结果表明该离子源弧放电稳定, 等离子体均匀性达到了同类大功率离子源的最好水平. 离子源运行参数如下: 灯丝电流: 900A—1100A; 弧电流: 100A—1050A; 弧电压: 50V—140V; 最高等离子体密度:  $2.5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ ; 等离子体密度的均匀性: 好于5%; 放电室内气压: 0.1Pa—0.8Pa; 脉宽: 3s.

### 3.2 弧放电伏-安曲线

对大功率离子源放电的V-I特性研究已经有诸多文献进行了详细的研究<sup>[7, 8]</sup>. V-I特性对大功率离子源放电的稳定性和离子源的效率影响很大. 影响弧-安特性的因素有离子源的几何尺寸、放电阳极面积、等离子体的磁场约束、热电子发射、气压等等. 从图4的HL-2A大功率离子源放电的弧-安特性来看, 放电的负阻区大大减小了. 通过控制上面提到的几大因素使等离子体放电十分稳定.

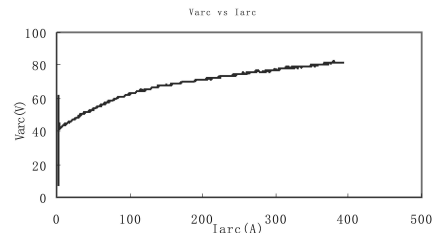


图4 HL-2A大功率离子源放电的典型伏-安特性

### 3.3 等离子体密度研究

图5是用郎缪尔探针测量的等离子体密度在电极附近的径向变化. 弧放电工作在第I区域(在负阻过度区前, 也称低放电效率区)和第II区域时(在负阻过度区后, 也称高放电效率区), 其饱和电流分布的形状基

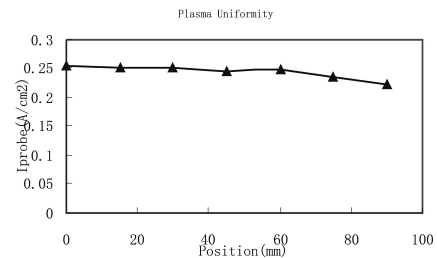


图5 HL-2A等离子体密度在径向上的分布

本相似, 等离子体密度均匀性好于5%.

### 3.4 放电稳定性研究

电弧的稳定性对于强流离子源的工作具有十分重要的意义, 特别对引出的影响最大. 引出的离子流  $I_{\text{acc}}$  与引出电压  $V_{\text{acc}}$  之间应满足  $I_{\text{acc}} = PV_{\text{acc}}^{3/2}$ , 其中  $P$  为导流系数, 而引出离子流正比于等离子体密度, 因而正比弧放电电流. 要使弧放电稳定, 一方面通过控制源的放电参数, 尽量减小负阻区的宽度; 另一方面必须改进放电电源, 使其有足够好的恒流输出特性.

### 3.5 质子比测量

为了提高离子束的质子比例, 在设计中加强了等离子体的约束. 在离子源研制过程中, 研制出了一种微型等离子体参数分析器, 用该分析器成功测量出了

$\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2^{2+}$  和  $\text{H}^3+$  在不同放电状态下比例的变化. 从测试的结果看, 在弧放电 700A 时,  $\text{H}^+$  的比例高于 85%.

### 3.6 离子束的引出

由于目前电源和实验平台上真空室尺寸的关系, 电极上 20% 的引出孔被盲掉, 初步的引出实验在 9 月初进行的, 引出离子束为 16A, 能量 32keV.

感谢朱祖林, 何嘉, 唐福生, 王学华等同志的工作; 在我们研制大功率离子源过程中得到了成都孙氏精密机械加工中心、成都锦华机械加工厂和成都四通整流器厂的有力支持和良好合作; 感谢美国加州大学劳伦斯贝克莱国家实验室的 Ka-Ngo Leung 教授和德国马克斯普朗克等离子体研究所的 Dr. E. Speth, Dr. P.Franzen; Dr.D.Holtum 等的有益讨论和支持.

## 参考文献(References)

- 1 The JET Team. JET-P(91)66, 1991
- 2 Stork D. Proc. 16th Symp. on Fusion Technology, London, 1990, 1: 111
- 3 JIANG Shao-Feng et al. Conception Design of Ion Source with Ion Beam Energy of 60KeV, Ion Current of 55A and Duration of 2s, GF 2005 (in Chinese)  
(姜韶凤等. HL-2A 60keV, 55A, 2S 离子源物理设计方案, 2005 年 GF 报告)
- 4 LEI Guang-Jiu et al. Design of Ion Source for HL-2A NBI, GF 2006
- 5 CAO Jian-Yong et al. Simulation of Magnetic Field Distribution of Ion Source for HL-2A Neutral Beam Injector, GF 2006 (in Chinese)  
(曹建勇等. 离子源磁场计算, 2006 年 GF 报告)
- 6 LEI Guang-Jiu et al. Analysis of Filament Current Distribution of Ion Source for HL-2A Neutral Beam Injector, GF 2007 (in Chinese)  
(雷光玖等. 大功率离子源灯丝馈电分析, 2007 年 GF 报告)
- 7 Dan M. Goebei Ion Source Discharge Performance and Stability Phys. Fluids, 1982, 25(6): 1093—1102
- 8 Yoshihide OKA, Tsutomu KURODA. The Effect of the Magnetic Field in the Behavior of Magnetic Multipole Discharge Japnese Journal of Applied Physics, 1993, 22(4): 688—694

## Ion Source for HL-2A Neutral Beam Injection

LEI Guang-Jiu<sup>1)</sup> JIANG Shao-Feng ZHONG Guang-Wu CAO Jian-Yong LU Da-Lun ZOU Gui-Qing  
LIU He ZHANG Xian-Ming JIANG Tao YANG Ji-Fang QIAN Jia-Mei TANG Li-Xing  
ZHOU Cai-Ping MAO Wei-Cheng LIU Yong  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract** An ion source for HL-2A Neutral Beam Injection (NBI) was operated successfully in March 2007, in Southwestern Institute of Physics. A bucket source type and three-grid-system are used in this new ion source design. The filament current of 1100A, filament voltage of 12V, arc current of 1050A, arc voltage of 120V, highest plasmas density of  $2.5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ , extracted ion beam density of  $0.44 \text{A} / \text{cm}^2$ , plasma density uniformity better than 5% in the area close to the first grid, duration of 2s, for this new source, have been achieved. The conceptual design, mechanical design and experiment result for the ion source are presented briefly in this paper.

**Key words** ion source, neutral beam injection, plasma heating