

HL-2M 装置 5 MW 中性束加热束线离子源放电室研制*

魏会领, 曹建勇, 余珮炫, 邹桂清, 周红霞,
杨宪福, 周博文, 罗怀宇, 耿少飞

(核工业西南物理研究院, 成都 610225)

摘 要: 为了给 HL-2M 装置建设一条 5 MW 中性束加热束线, 开展了中性束加热用热阴极弧放电离子源放电室的研制。这条中性束束线包含 4 套 80 kV/45 A/5 s 离子源, 放电室的设计指标为 850 A/5 s。首先采用 CST 软件中的电磁工作室对特定几何结构的放电室会切磁场进行了模拟计算, 得到了会切磁场分布, 验证了会切磁场布局的合理性。针对放电室加工工艺和实验过程中局部拉弧等问题, 对放电室结构进行了不断改进。放电室侧壁由 40 列会切磁体改为 7 圈环形磁体, 阴极灯丝结构从灯丝板结构最终改为陶瓷可伐结构, 并且在放电室和加速器之间增加了陶瓷屏蔽。在阴极板结构放电室和阴极陶瓷可伐结构放电室内都获得了正常的弧放电。最终定型的放电室采用周边 7 圈环形会切磁体和陶瓷可伐结构。在定型的放电室内达到了 5 MW 中性束束线离子源弧放电的指标。弧放电时间接近 5 s, 最大弧放电电流达到 1 000 A。

关键词: HL-2M 装置; 中性束加热; 离子源; 弧放电室

中图分类号: O532.26; O562.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190275

Development of ion source discharge chamber for the 5 MW neutral beam heating line on HL-2M device

Wei Huiling, Cao Jianyong, Yu Peixuan, Zou Guiqing, Zhou Hongxia,
Yang Xianfu, Zhou Bowen, Luo Huaiyu, Geng Shaofei

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

Abstract: To construct a 5 MW neutral beam heating beamline for HL-2M device, the development of the discharge chamber of the hot cathode arc discharge ion source for neutral beam heating was carried out. The neutral beamline contains four sets of 80 kV/45 A/5 s ion sources, and the discharge chamber design index is 850 A/5 s. Firstly, the electromagnetic studio in CST software was used to simulate the cusp magnetic field of the discharge chamber with specific geometric structure, and the cusp magnetic field distribution was obtained, which verified the rationality of cusp magnetic field layout. To solve the problems in the process of the discharge chamber and the localized arcing in the experiment, the structure of the discharge chamber was improved. The side wall of the discharge chamber changed from 40 rows of cusp magnets to 7 rings of cusp magnets, the cathode structure changed from the filament plate structure to the ceramic kovar structure, and a ceramic shield was added between the discharge chamber and the accelerator. Normal arc discharge was obtained in both the cathode plate discharge chamber and the cathode ceramic kovar discharge chamber. The final shaped discharge chamber adopted 7-ring cusp magnets and ceramic kovar cathode structure. The arc discharge index of the 5 MW neutral beamline ion source was achieved in the final shaped discharge chamber. The arc discharge time was close to 5 s, and the maximum arc discharge current reached 1 000 A.

Key words: HL-2M device; neutral beam heating; ion source; arc chamber

中性束注入加热物理机制清楚, 加热效率高, 适用的等离子体参数范围宽, 是磁约束聚变实验装置必不可少的辅助加热系统^[1]。随着磁约束聚变实验装置尺寸扩大和聚变等离子体研究的深入, 需要的辅助加热系统规模和运行参数不断增加^[2-4]。国际热核聚变实验堆 (ITER) 以及中国聚变工程试验堆 (CFETR) 装置, 需要注入的中性束粒子能量达到 1 MeV, 束脉冲宽度超过 1 000 s。在国内 ITER 计划专项的资助下, HL-2A, EAST 以及正在安装的 HL-

* 收稿日期: 2019-07-24; 修订日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11405048); 国际热核聚变实验堆计划专项 (2011GB103000)

作者简介: 魏会领 (1982—), 女, 博士, 副研究员, 现主要从事磁约束核聚变中性束加热系统科研工作; weihuiling2233@163.com。

2M装置,都建设了基于正离子源的中性束注入加热系统^[5-10]。在中性束加热的条件下,HL-2A装置开展的物理实验取得了重大进展^[11-12]。HL-2M装置建设的第一条中性束束线注入加热功率为5 MW,包含了4个热阴极弧放电正离子源。单个离子源参数指标是80 kV/45 A/5 s,弧放电电流为850 A,灯丝电流为2 050 A。本文主要针对HL-2M装置第一条5 MW中性束束线离子源放电室的研制,重点介绍在放电室加工和实验过程中出现的问题和改进的方法,主要包括:磁位型模拟计算,放电室加工和改进,放电室定型。

1 放电室磁位型模拟计算

根据目前正在运行的HL-2A装置中性束加热系统45 kV/20 A离子源的弧放电和离子束引出特性,HL-2M装置NBI注入窗口尺寸和注入功率为5 MW的总体设计指标,设计了80 kV×45 A×5 s离子源。离子源加速器采用及时水冷的多孔4电极结构,引出区域为135 mm×450 mm,引出孔径为8 mm,孔数422个。每层电极采用夹角为179.1°上下两片电极倾斜汇聚方式^[13]。

HL-2M装置5 MW离子源放电室的尺寸设计为长56 cm,宽26.6 cm,深24 cm。放电室内布有16根阴极钨灯丝,灯丝直径为1.5 mm,长为15 cm。放电室内壁上布有永久磁体形成会切磁场,永久磁体表面磁场强度约为0.4 T,磁体表面距离放电室内壁表面5 mm,在放电室表面会切线上磁体强度约为0.13 T。放电室侧壁布有冷却水水道。

为HL-2M装置设计的第一套放电室结构如图1所示。放电室侧壁和背板为弧放电阳极,壁上布有40列钕钴永久磁体,并加工有40列与磁体平行的冷却水水道,放电室盖板上布有12列永久磁体,以及冷却水水道。放电室上有两块用来连接灯丝背板,分别接灯丝电源的正端和负端,16根灯丝并联于灯丝板之间,作为弧放电阴极。

根据束流引出特性要求,离子源引出区域磁场强度不能超过0.002 T。根据上述放电室尺寸和会切磁体分布情况,采用CST软件中的电磁工作室详细计算了等离子体放电室内的磁场分布。改变永久磁体表面磁场强度设置值得到不同情况下的放电室磁场分布,如图2所示。图2中建立的坐标系以离子束引出的方向为 z 轴正方向,放电室的宽度方向为 x 方向,长度方向为 y 方向,放电室背板中心为原点。引出区域是在 x 方向范围为(-6.75 mm, 6.75 mm), y 方向范围为(-225 mm, 225 mm)的一个矩形区域。磁场分布分别沿 xOz 平面和 yOz 平面对称。模拟计算结果可以看出,引出区域的磁感应强度均小于0.001 T,能够满足实验需求。图2给出了两个特定位置处的磁场强度分布情况。

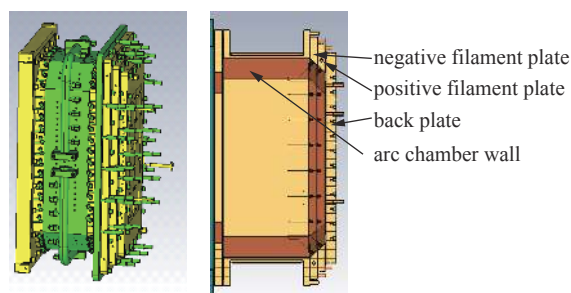


Fig. 1 Ion source discharge chamber with 40 columns of magnets

图1 周边40列磁体的离子源放电室

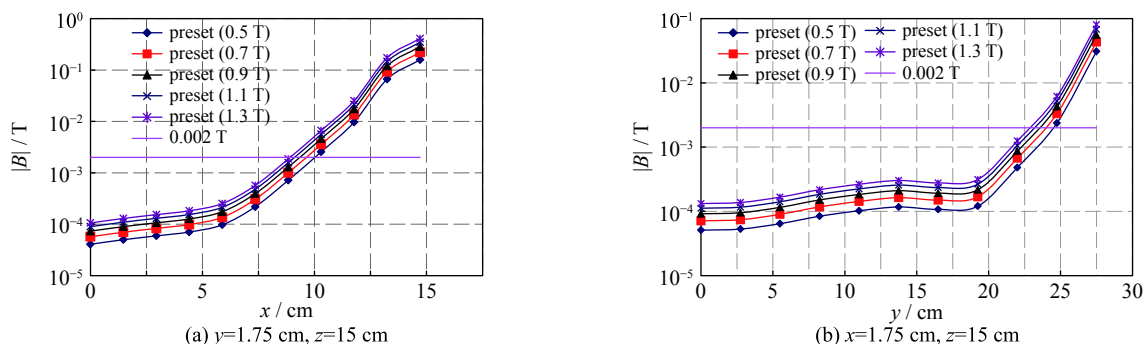


Fig. 2 Magnetic field distribution of ion source discharge chamber

图2 离子源放电室磁场分布

2 放电室的加工和改进

2.1 周边40列会切磁体铜放电室

首次加工放电室的材料采用了铸造无氧铜,放电室腔体采用整挖铜块成型,磁铁槽和冷却水道采用从法兰上穿孔再堵销的加工方式,最后在磁铁槽的正上方法兰上加工密封圈槽。尽管最大限度地精确控制了每个销子的尺寸和堵销过程,加工的放电室仍旧无法通过真空和水漏检测。

2.2 周边 40 列会切磁体不锈钢放电室

为了尽快开展弧放电实验,加工了一个不锈钢材料的放电室腔体,法兰采用氩弧焊焊接与腔体相连,如图 3 所示。灯丝板与放电室之间,灯丝板之间用聚四氟乙烯片绝缘。初期典型的弧放电波形如图 4 所示。其中,气压采用薄膜硅进行测量,灯丝电流和弧流采用电流传感器测量,灯丝电压和弧压采用分压器测量。尽管弧流已经达到约 430 A,弧压仅为 43 V 左右,远低于正常弧放电过程中的弧压(80 V 左右)。改变弧放电电流值,弧压没有明显变化。

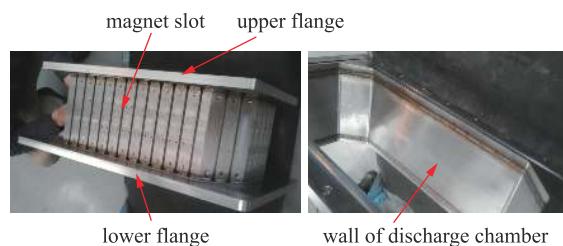


Fig. 3 Stainless steel discharge chamber

图 3 不锈钢放电室腔体

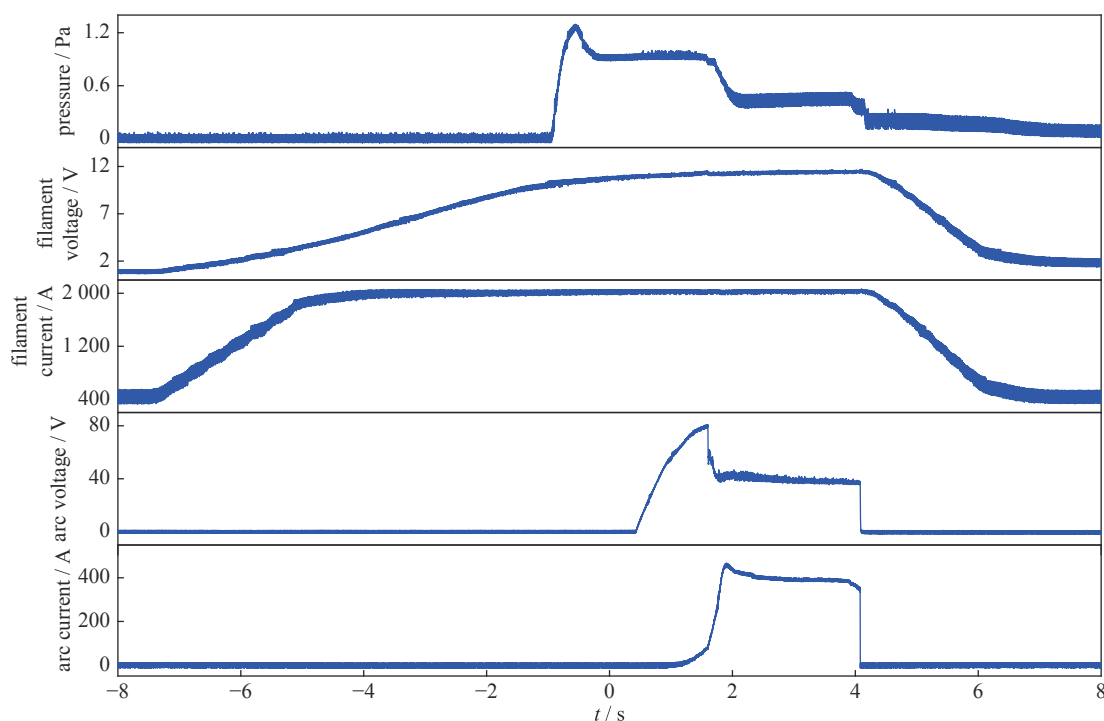


Fig. 4 Abnormal arc discharge waveforms

图 4 非正常弧放电波形

打开放电室发现灯丝板和放电室之间有局部烧灼痕迹,如图 5 所示。多数拉弧部位都位于靠近灯丝处。在远离放电室表面较远处的灯丝板上(离灯丝较远)也发生了拉弧现象。局部拉弧形成局部大电流,引起局部融化。将四氟绝缘片向放电室内部多伸出一些,重新安装后,得到了基本正常的弧放电波形。

2.3 7 圈环形磁体铜放电室

进一步优化铜放电室的结构,侧壁水冷和会切磁体采用环形结构,优点是外围水管接头少,连接方便。放电室腔体上下法兰采用钎焊的方式与中间部分连接,侧壁水道用边长 10 mm\内径 5 mm 的方铜管水道,采用钎焊的方式焊接在侧壁上。水管道之间有磁铁槽,形成 7 圈近似环形结构的会切磁体。放电室背板上布有平行于宽度方向上的 12 列磁体形成会切磁场,磁体两侧布有水冷管道。水管接头和堵头都是采用钎焊的方式连接至主体部分。安装就位于测试平台上的放电室如图 6 所示。

实验发现,尽管放电室腔体上法兰内测,悬浮板内边缘都加工了圆角,仍旧不能避免局部拉弧现象。增加放电室和悬浮板,以及背板和悬浮板之间的绝缘片向内侧延伸的距离,或者将绝缘片从 1 mm 增加至 3 mm,局部拉弧现象有明显减少。陶瓷是耐高温且放气率低的绝缘材料,在上下两个悬浮板上安装了陶瓷片,遮挡放电室与悬浮板以及放电室背板与悬浮板之间的连接部分。一方面可以增加两者之间在等离子体内的距离,减少和避免局部拉弧,另一方面避免四氟片直接裸露于真空室内,防止其融化或烧灼。弧放电正常,弧流 700 A,弧放电时间接近 5 s 的波形如图 7 所示。在弧放电期间,灯丝电压增加,气压降低,弧压约为 85 V。经过锻炼后,弧放电电流达到 1 kA。弧放电实验结束后,打开放电室背板,绝缘陶瓷片接近完好,且没有发现明显的拉弧现象。证明了这种陶瓷屏蔽的

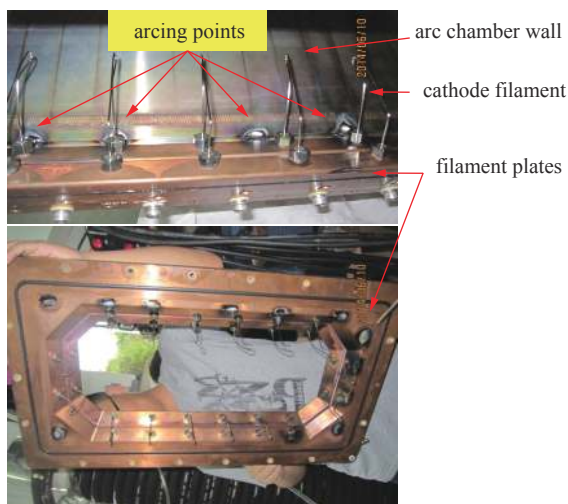


Fig. 5 Burning marks caused by local arcing in the discharge chamber

图 5 放电室内局部拉弧引起的烧灼痕迹

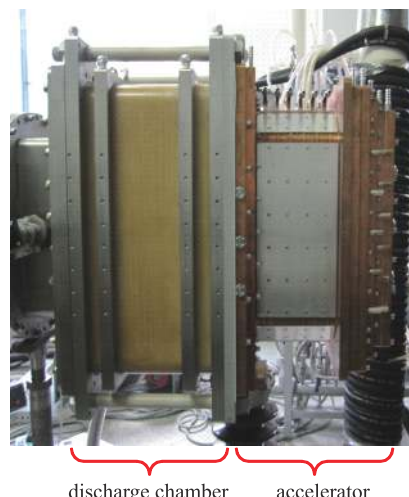


Fig. 6 Discharge chamber mounted on the test platform

图 6 安装于测试平台上的放电室

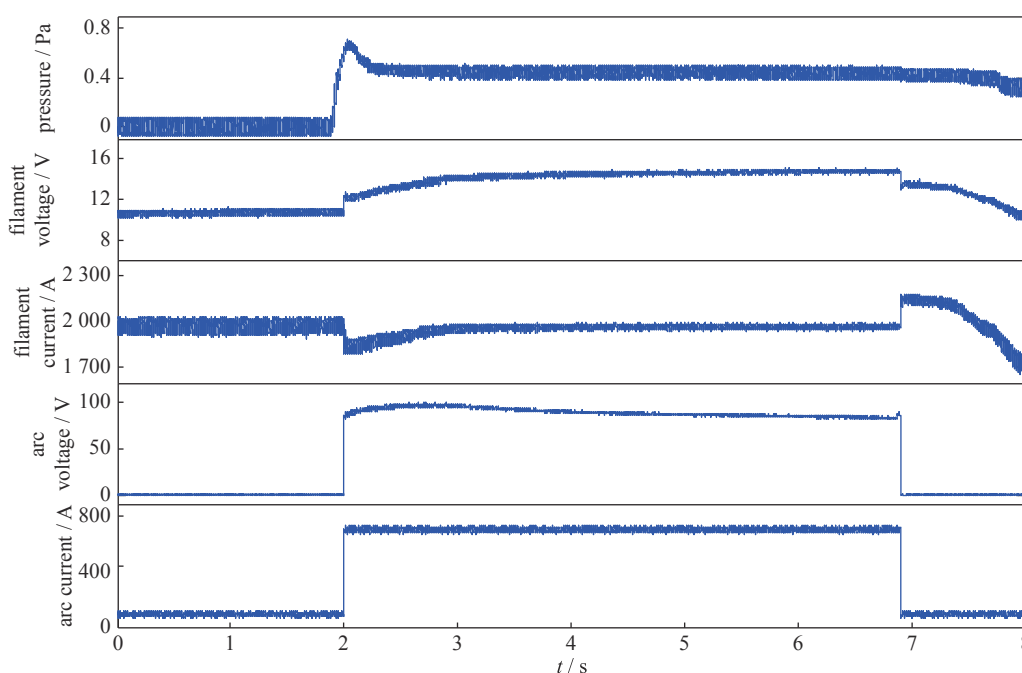


Fig. 7 Typical arc discharge waveforms

图 7 典型的弧放电波形

方法可以大大减少局部拉弧现象发生。灯丝板结构放电室的缺点是容易出现局部拉弧,优点是冷却效果很好,可以满足较长脉冲的弧放电需求。

2.4 陶瓷可伐背板

参考 HL-2A 装置中性束系统弧放电离子源采用的灯丝可伐结构,为 HL-2M 装置 5 MW 中性束离子源放电室加工了可伐结构灯丝背板。最开始设计加工的陶瓷可伐灯丝裸露端与盖板面距离较近,在灯丝杆和放电室背板之间出现拉弧。增加了灯丝末端至放电室背板的距离后,弧放电正常。为了尽可能避免局部拉弧,放电室内部灯丝支架采用陶瓷碗和陶瓷管重叠的方式屏蔽^[14]。

灯丝杆采用直接用螺钉固定的方式与阴极铜板相连接,当灯丝杆与铜板之间不完全垂直时,螺钉固定的方式使得可伐受力不均匀,容易损坏。因此,须将这种硬连接方式改为用软铜线过度连接的方式。为了有效降低长脉冲弧放电过程中灯丝杆的温度,在灯丝杆上焊接了细铜管水冷回路^[15]。

将离子源放电室和加速器同时安装于测试平台上,将加速器第一电极与灯丝阴极直接相连。在弧放电过程中,弧室与第一电极之间出现拉弧,这是因为产生等离子体后,放电室与第一电极之间形成电流,当电流较大时,

弧放电不正常。在放电室的下法兰上安装了陶瓷屏蔽板^[16], 并在第一电极与灯丝阴极之间接入一个 $5\ \Omega$ 的限流电阻, 即使发生拉弧, 电流占比也很小, 不会影响正常弧放电。实验证明, 这种屏蔽和接线方式有效避免了放电室与第一电极之间的局部拉弧。

陶瓷可伐灯丝盖板已经安装于测试平台上, 并开展了弧放电实验。改进后的放电室弧放电稳定, 阴极灯丝柱冷却状态良好, 能够满足实验需求。其结构模型如图 8 所示, 该结构被确定为最终定型的离子源放电室结构。

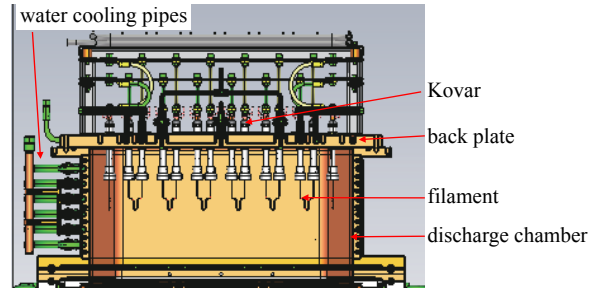


Fig. 8 Final structure of 80 kV/45 A/5 s ion source discharge chamber for HL-2M device

图 8 HL-2M 装置 80 kV/45 A/5 s 离子源放电室最终结构

3 结论

为了能够取得 HL-2M 装置中性束离子源弧放电指标, 先后分别加工了四种结构的放电室, 周边 40 列磁体放电室, 不锈钢腔体放电室, 7 圈环形磁体放电室, 和可伐背板结构放电室。本文介绍了在加工和实验过程中所遇到的问题 and 解决途径。通过不断改进, 无论是灯丝板结构的放电室, 还是陶瓷可伐结构的放电室, 都获得了正常的弧放电, 并且达到了中性束离子源弧放电室的指标。弧放电额定态时间接近 5 s, 最大弧放电电流达到 1 kA。综合考虑, 最终 HL-2M 装置第一条 5MW 中性束束线离子源放电室定型为侧壁 7 圈环形磁体和陶瓷可伐背板结构的放电室。

通过研制 HL-2M 装置中性束离子源放电室, 使我们逐渐深入了解了大功率弧放电室结构设计可能出现的问题和设计关键点, 掌握了大功率离子源弧放电室设计技术和优化弧放电室设计的能力。总之, 在放电室设计过程中, 无论采用灯丝板结构还是陶瓷可伐结构, 值得注意的是: 确保灯丝阴极与弧放电阳极之间的最短距离为灯丝与放电室之间的距离, 避免局部拉弧, 无法获得正常弧放电。

参考文献:

- [1] Kadomtsev B B, Troyon F S, Watkins M L, et al. Tokamaks[J]. *Nuclear Fusion*, 1990, 30(9): 1675.
- [2] Duesing G, Altmann H, Falter H, et al. Neutral beam injection system[J]. *Fusion Technology*, 1987, 11(1): 163-202.
- [3] Fujita T. High-performance experiments towards steady-state operation in JT-60U[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1997, 39, B75.
- [4] Okumura Y, Fujiwara Y, Inoue T, et al. High power negative ion sources for fusion at the Japan Atomic Energy Research Institute[J]. *Review of Scientific Instrument*, 1996, 67(3): 1092-1097.
- [5] Cao Jianyong, Wei Huiling, Liu He, et al. Empirical scaling law of neutral beam injection power in HL-2A tokamak[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32: 052902.
- [6] 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: 872-877.
- [7] 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.
- [8] Wei H L, Cao J Y, Rao J, et al. The dependence of extracted current on discharge gas pressure in neutral beam ion sources on HL-2A tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 023302.
- [9] Hu C D, Xu Y J, Xie Y H, et al. The recent development of the EAST neutral beam injector[J]. *Chinese Physics Letter*, 2015, 32: 052901.
- [10] Xu Y J, Hu C D, Liu S, et al. Preliminary experimental study of ion beam extraction of EAST neutral beam injector[J]. *Chinese Physics Letter*, 2012, 29: 035201.
- [11] Chen W, Yu L M, Ding X T, et al. Core-localized Alfvénic modes driven by energetic ions in HL-2A NBI plasmas with weak magnetic shears[J]. *Nuclear Fusion*, 2016, 56: 036018.
- [12] Chen W, Ding X T, Yu L M, et al. Observation of energetic-particle-induced GAM and nonlinear interactions between EGAM BAEs and tearing modes on the HL-2A tokamak[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 113010.
- [13] 曹建勇, 魏会领, 刘鹤, 等. HL-2M装置中性束注入加热系统研制进展[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 106001. (Cao Jianyong, Wei Huiling, Liu He, et al. Latest progress of development of the neutral beam injection heating system on HL-2M Tokamak[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 106001)
- [14] 魏会领, 曹建勇. 一种离子源放电室内夹紧螺母灯丝支架的屏蔽结构: CN106935472B[P]. 2018-11-30. (Wei Huiling, Cao Jianyong. Shielding structure for filament support adopting clamping nuts in ion source discharge chamber: CN106935472B[P]. 2018-11-30)
- [15] 魏会领, 曹建勇. 一种离子源放电室阴极灯丝杆的连接和冷却结构: CN106935460B[P]. 2018-09-28. (Wei Huiling, Cao Jianyong. Ion source discharge chamber cathode filament rod connection and cooling structure: CN106935460B[P]. 2018-09-28)
- [16] 魏会领, 曹建勇. 一种离子源放电室与加速器之间的陶瓷屏蔽结构: CN106935471B[P]. 2018-11-30. (Wei Huiling, Cao Jianyong. Ceramic shielding structure between ion source discharge chamber and accelerator: CN106935471B[P]. 2018-11-30)