

EAST-NBI 反向电子吸收板换热计算与分析

许永建¹ 栗翔^{1,2} 胡纯栋¹ 于玲¹ 陶玲¹
谢亚红¹ 蒋才超¹ 顾玉明¹ 李军¹

1 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2 (中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 中性束注入是托卡马克主要的辅助加热手段。目前先进实验超导托卡马克中性束注入(Experimental Advanced Superconducting Tokamak-Neutral Beam Injection, EAST-NBI)装置采用的是正离子源,运行过程中离子源的部分部件有很大的热沉积,其中反向电子吸收板最为严重。经实验研究,当束功率为3.5 MW时,沉积在反向电子吸收板上的平均功率密度高达 $4.4 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,有着较大的换热负担。为探究反向电子吸收板的极限运行时间,采用数值模拟的方法,对反向电子吸收板在不同束功率、冷却水水压等多种工况进行了计算。结果表明,电子吸收板随着束功率的增大,换热负担加重、换热效果变差,通过增压泵提高冷却水入口压力一定程度上可以提高换热能力,使其极限运行时间延长。对该课题的研究可以指导 EAST-NBI 的运行,以保证离子源安全、稳定工作,此外还为反向电子吸收板的进一步结构优化奠定理论基础,对发展长脉冲、高功率的离子源具有重要意义。

关键词 中性束注入, 电子吸收板, 换热, 极限运行时长, 数值模拟

中图分类号 TL67, TL65, TK121

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100602

Analysis of heat transfer capacity of electron dump on EAST-NBI

XU Yongjian¹ LI Xiang^{1,2} HU Chundong¹ YU Ling¹ TAO Ling¹
XIE Yahong¹ JIANG Caichao¹ GU Yuming¹ LI Jun¹

1(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Background: Neutral beam injection is one of the main auxiliary heating methods in controllable nuclear fusion experiment. The positive ion source is adopted in the EAST-NBI (Experimental Advanced Superconducting Tokamak-Neutral Beam Injection) device, and during its operation, there is a large energy deposition on ion source components, especially on the electron dump. According to previous research, when beam power is 3.5 MW, the average power density deposited on electron dump is around $4.4 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, which may cause great burden for its heat transfer capacity. **Purpose:** Research on the heat transfer conditions of electron dump is of great significance. **Methods:** A numerical simulation method is adopted to calculate the heat transfer effect with the change of beam power and inlet pressure of cooling water, and the maximum operating time of electron dump is obtained. **Results:** The results show that the heat transfer effect decreases with beam power growth, and by enhancing the inlet pressure of cooling water via booster pump, heat transfer capacity gets better to some extent, which can extend the maximum

国家自然科学基金(No.11405207、No.11505225)资助

第一作者: 许永建, 男, 1977年生, 2009年于中国科学院等离子体物理研究所获博士学位, 现为副研究员, 研究领域为中性束诊断及实验研究
通信作者: 蒋才超, E-mail: jcch@ipp.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11405207, No.11505225)

First author: XU Yongjian, male, born in 1977, graduated from Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2009, associate research fellow, focusing on neutral beam diagnosis and experimental research

Corresponding author: JIANG Caichao, E-mail: jcch@ipp.ac.cn

收稿日期: 2016-06-23, 修回日期: 2016-08-19

operating time of electron dump. **Conclusion:** This research can guide EAST-NBI ion source to operate safely and steadily. Moreover, it can lay a foundation for increasing heat transfer capacity *via* structure optimization in future work, which is meaningful for the development of long pulse and high power ion source.

Key words Neutral beam injection, Electron dump, Heat transfer, Maximum operating time, Numerical simulation

中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热是对托卡马克等离子体外部加热和维持的重要手段之一^[1-6]。它主要通过电荷交换和粒子间碰撞实现对离子和电子的加热,是目前在托卡马克上除了欧姆加热外,对等离子体外部加热和维持的4种主要加热手段(中性束注入、低杂波、离子回旋频段波、电子回旋频段波)中加热效率最高、物理机制最清楚的手段。先进实验超导托卡马克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)建有两条中性束注入束线,均采用正离子源,以满足其稳态、高参数运行的需要。EAST-NBI须满足高功率、长脉冲运行的初期建设要求,即实现束能量50–80 keV可调、脉宽10–100 s、功率2–4 MW情况下的运行^[7-10]。

强流离子源反向电子的产生存在于束引出的过程中,离子束经过缝型引出系统时会与引出电极和从离子源弧室扩散到引出系统的中性气体分子发生碰撞,产生电子。这些电子一部分打到等离子体电极和梯度极上形成电极负荷,一部分经引出电极的高场加速后进入离子源放电室,形成高能的反向电子流,打到电子吸收板上^[11]。经实验研究,在NBI运行的过程中,反向电子吸收板的换热压力最为严重,当束功率为3.5 MW时,沉积在反向电子吸收板上的平均功率密度高达 $4.4 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,实验过程中曾出现反向电子吸收板被烧蚀的现象^[12]。如今,随着计算机技术和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的发展,数值模拟方法为研究流体传热和流动提供了重要手段^[13]。本文利用ANSYS软件模拟了电子吸收板在不同束功率、冷却水水压等工况下的运行情况,并直观地观察反向电子吸收板的温度分布情况并分析该结构对传热过程的影响。

1 反向电子吸收板

1.1 物理模型

离子源反向电子吸收板结构及冷却水回路如图1所示。反向电子吸收板与灯丝座之间有隔离板,并装有麦拉绝缘密封。反向电子吸收板采用无氧铜材料,外形尺寸为 $698.5 \text{ mm} \times 238 \text{ mm} \times 44.45 \text{ mm}$ 。吸收板背部有磁体槽,用来安装永久磁体^[14]。离子源采用缝型束引出系统,束引出时,存在高能的反

向电子轰击在吸收板上,主要集中在束引出面($480 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$)上。因电子吸收板上有较高的热负荷,故在吸收板上通过深孔钻设计有多路水冷却管,以满足对离子源长脉冲的要求。板中间并排设有4根内径为6.35 mm的管道,板长边方向两侧各设有直径为24.6 mm的一根粗冷却管路,这些光滑直管通过外接软管来实现冷却水循环回路。

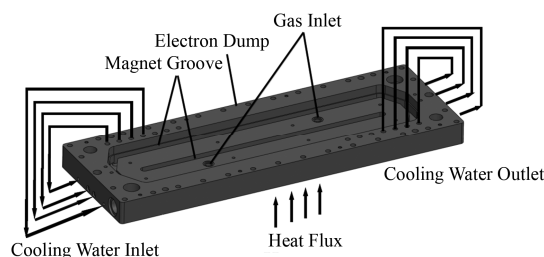


图1 电子吸收板结构及冷却水回路
Fig.1 Structure and cooling water circulation circuit of electron dump.

1.2 计算模型及假设

为探究反向电子吸收板在不同工况下的运行情况,分别模拟计算了电子吸收板在冷却水入口水压一定的情况,束功率从2 MW到4 MW时运行时间的变化;在功率一定的情况下,随入口冷却水水压从0.2 MPa到0.8 MPa的变化(系统设计压力最高1 MPa)。管内流体与电子吸收板间的换热主要为导热和对流的复合传热过程,为计算方便,模拟过程中做了如下简化与假设:

- 1) 假定电子吸收板的热流密度均匀分布;
- 2) 建模过程中忽略螺栓孔、气孔及圆角等加工工艺对换热的影响;
- 3) 电子吸收板冷却管简化为通管;
- 4) 忽略高温部件对周围环境(空气及其他部件)散热;
- 5) 冷却水不可压缩,且进、出口压力保持恒定;
- 6) 各种工况下,冷却水进口水温均为环境温度(293 K);
- 7) 中间管道高温区有少量气泡产生,一定程度上加强了换热,但气泡较少,结果差别不大。主流仍为过冷态,所以这里模拟采用单相计算。

1.3 控制方程

基于不可压缩的牛顿型流体, 在常物性和宏观热能守恒的假设下, 流体流动和传热必须满足以下控制方程^[15-16]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 是密度; t 是时间; $\mathbf{U}$ 是速度矢量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式(2)–(4)也称动量守恒方程或 Navier-Stokes 方程。

式中: u 、 v 和 w 是速度矢量 $\mathbf{U}$ 在 x 、 y 和 z 方向的分量; p 是流体微元体上的压力; μ 是动力粘度; S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{U}) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (5)$$

式中: T 为温度; λ 是第二粘度; c_p 为比热容; S_T 为粘性耗散项。

此外, 湍流模型选用的 $RNG\ k-\varepsilon$ 模型在连续性方程与雷诺方程的基础上, 再建立一个湍动能的输运方程和一个湍流耗散率方程, 经简化, 使湍流的一组方程式在附加了 k 和 ε 的两个方程后构成封闭问题, 从而能结合具体的边界条件求解^[17]。

2 结果与分析

2.1 电子吸收板换热计算

模拟管道采用压力入口, 通过迭代, 得到电子吸收板的温度分布情况。这里以常用入口水压 0.2 MPa、束功率 4 MW 为例进行分析。以电子吸收板材料无氧铜的软化温度 573 K 为阈值, 当表面最高点温度达到 573 K 时, 温度分布见图 2。可以发现, 外侧的冷却水管与中心冷却水管间的部分温度最高, 原因是这部分距离冷却管道较远, 所以换热情况相比于其他地方较高。为更清楚地了解热流面上温度场, 图 3 给出了温度场沿短边的分布。

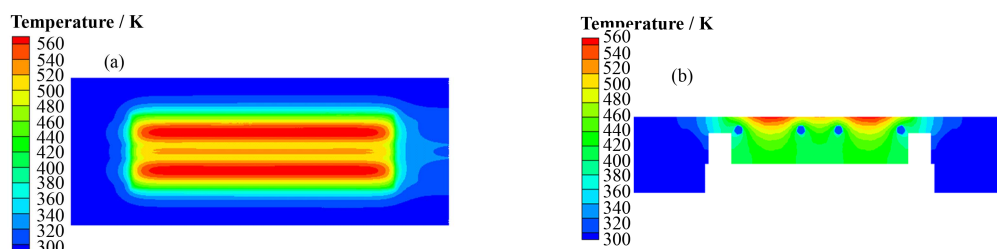


图 2 电子吸收板热流面温度分布 (a) 俯视图, (b) 侧视图

Fig.2 Heat flux surface temperature distribution of electron dump. (a) Top view, (b) Side view

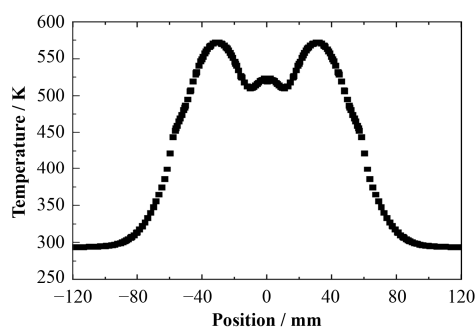


图 3 热流面中间位置温度沿短边方向的变化

Fig.3 Temperature change along the short length of electron dump on middle of heat flux surface.

图 4 是电子吸收板上最高点的温度随运行时间的变化趋势。由图 4 可以发现, 温度是随时间先迅

速增加然后缓慢爬升, 最后达到稳态。在该工况下当温度达到 573 K 时, 电子吸收板极限运行时长为 6.64 s。

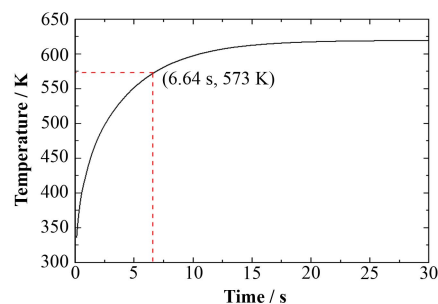


图 4 电子吸收板极限运行时间(0.2 MPa, 4 MW)

Fig.4 The maximum operating time of electron dump (0.2 MPa, 4 MW).

2.2 随束功率变化

为探究电子吸收板在不同束功率下的换热情况,对入口水压在 0.2 MPa 条件下,束功率从 2 MW 到 4 MW 时进行了模拟分析。图 5 是电子吸收板表面最高温度随工作时间的变化趋势,可以明显看出,各束功率下表面温度的上升趋势基本相似,温度增长由快到慢最后保持不变,达到动态平衡。达到 573 K 时电子吸收板的极限工作时间随束功率的增加,明显减少。

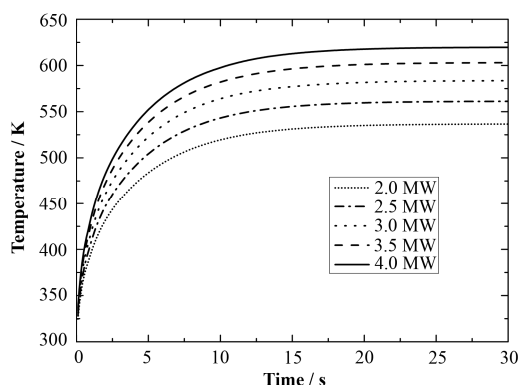


图 5 不同束功率下表面最高温度随运行时间的关系
Fig.5 The relationship between maximum surface temperature and operating time at different beam power.

2.3 随冷却水水压变化

为更好地指导实验,延长电子吸收板的工作时间,以满足 EAST 对 NBI 离子源长脉冲、高功率的运行要求,在 4 MW 束功率下对电子吸收板不同冷却水进口水压进行了增压计算,发现随冷却水入口水压的提高,表面最高温度有所降低、极限工作时间延长,如图 6 所示,即通过增压泵提高水压是一种保证系统安全、稳定的有效方法。

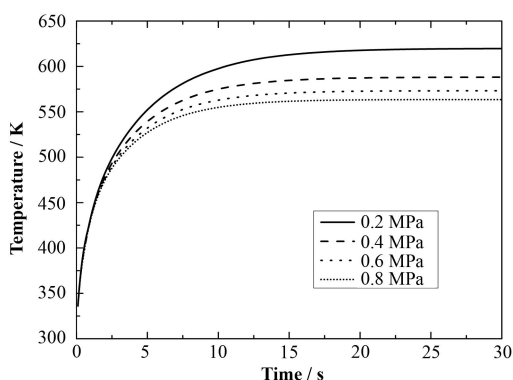


图 6 不同冷却水入口水压下表面最高温度随运行时间的关系

Fig.6 The relationship of maximum surface temperature and operating time at different pressure inlet of cooling water.

图 7 是电子吸收板在该束功率下,平衡温度随冷却水入口水压变化的拟合曲线,由拟合曲线可以发现当冷却水入口水压超过 0.577 MPa 时,电子吸收板表面最高温度将不会达到软化温度,即一直处于安全运行的范围内。

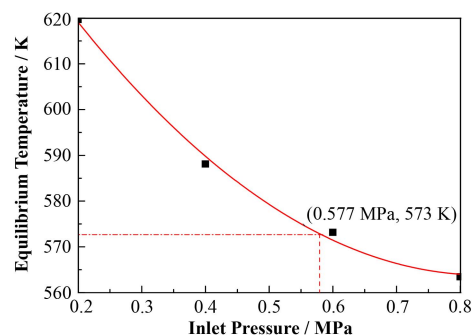


图 7 平衡温度随冷却水入口水压变化的拟合曲线
Fig.7 The fitting curve of equilibrium temperature at different pressure inlet of cooling water.

3 结语

中性束注入加热是对托卡马克等离子最有效的加热手段之一。EAST-NBI 装置采用的是正离子源,在设备的运行过程中离子源的部分部件会有较大的热量沉积,其中对电子吸收板的换热能力及其实验运行是很大的考验。对电子吸收板在不同功率、不同压力下的模拟计算可以明显发现:电子吸收板在一定水压下随着束功率的增加,极限运行时间明显减少;提高水压可以适当延长电子吸收板的工作时长,保证系统的安全稳定,因此可以增设增压系统来延长离子源的工作时间。对 NBI 离子源反向电子吸收板在各工况下运行能力的探究,对指导 NBI 系统目前安全、稳定的运行具有重要的意义,但提高水压是以牺牲泵功为代价的,并不能从根本上解决问题,还需要进一步利用强化换热技术对电子吸收板进行加强换热,如利用内插物等。此外,对 NBI 离子源反向电子吸收板在各工况下运行能力的探究能为后期对离子源高热流承载部件的换热结构优化奠定理论基础,对发展长脉冲、高功率的正离子源具有重大意义。

参考文献

- 1 Hu C D. First achievement of plasma heating for EAST neutral beam injector[J]. Plasma Science and Technology, 2015, 17(1): 1-3. DOI: 1009-0630/17/1/01
- 2 Liang L Z, Hu C D, Xie Y L, et al. Calculation of beam intensity distribution for the neutral beam injection in EAST[J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13(4):

- 502–505. DOI: 10.1088/1009-0630/13/4/22
- 3 Xie Y L, Hu C D, Liu S, *et al.* The R&D progress of 4 MW EAST-NBI high current ion source[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, **85**(2): 02B315. DOI: 10.1063/1.4916457
- 4 Xu Y J, Hu C D, Xie Y L, *et al.* Analysis of the cooling water temperature rise of accelerating electrodes in EAST neutral beam injector beam extraction[J]. Chinese Physics Letters, 2013, **30**(3): 032901. DOI: 10.1088/0256-307x/30/3/032901
- 5 Xu Y J, Hu C D, Yu L, *et al.* Progress of beam diagnosis system for EAST neutral beam injector[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, **87**(2): 02B934. DOI: 10.1063/1.4936998
- 6 陶玲, 胡纯栋, 谢远来, 等. 全超导托卡马克中性束注入系统离子吞食器工程设计[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(10): 2687–2692. DOI: 10.3788/HPLPB20132510.2687
TAO Ling, HU Chundong, XIE Yuanlai, *et al.* Engineering design of ion dump for EAST neutral beam injection system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, **25**(10): 2687–2692. DOI: 10.3788/HPLPB20132510.2687
- 7 胡立群, 张晓东, 姚若河. EAST 托卡马克的中性束注入方案[J]. 核技术, 2006, **29**(2): 149–152. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2006.02.018
HU Liqun, ZHANG Xiaodong, YAO Ruohu. EAST neutral beam injection project for EAST tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2006, **29**(2): 149–152. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2006.02.018
- 8 Hu C D, Xie Y L, Liu S, *et al.* First plasma of megawatt high current ion source for neutral beam injector of the experimental advanced superconducting tokamak on the test bed[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, **82**(2): 023303. DOI: 10.1063/1.3545843
- 9 Hu C D, Xie Y H, Xie Y L, *et al.* Performance of positive ion based high power ion source of EAST neutral beam injector[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, **87**(2): 02B301. DOI: 10.1063/1.4931709
- 10 胡纯栋, 许永建. EAST 中性束注入器最新研制进展[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110603
HU Chundong, XU Yongjian. The latest development of EAST neutral beam injector[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110603
- 11 Chen Y Q, Hu C D, Liu Z M, *et al.* Study the characteristic of the hot cathode of high current ion source[J]. Journal of Fusion Energy, 2013, **32**(5): 536–539. DOI: 10.1007/s10894-013-9609-x
- 12 Li X, Xu Y J, Hu C D, *et al.* Analysis of energy deposition on ion source components of EAST neutral beam injector[J]. Fusion Science and Technology, 2016, **70**(3): 429–434. DOI: 10.13182/FST15-251
- 13 何杰, 夏晓彬, 蔡军, 等. 2 MW 液态钍基熔盐实验堆主屏蔽温度场分析[J]. 核技术, 2016, **39**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040601
HE Jie, XIA Xiaobin, CAI Jun, *et al.* Temperature field analysis for the main shielding of the 2-MW thorium-based molten salt experimental reactor[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040601
- 14 陈俞钱, 谢亚红, 胡纯栋, 等. EAST NBI 强流离子源反向电子流沉积计算[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(增): 497–501. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S1.0497
CHEN Yuqian, XIE Yahong, HU Chundong, *et al.* Calculation of deposited energy of backstream electrons for EAST NBI high current ion source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(Suppl): 497–501. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S1.0497
- 15 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- 16 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
TAO Wenshan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001
- 17 徐志明, 刘枫, 朱宏娟. 内置螺旋线圈换热管换热分析及数值模拟[J]. 东北电力大学学报, 2014, **34**(5): 5–10. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2014.05.002
XU Zhiming, LIU Feng, ZHU Hongjuan. Thermal analysis and numerical simulation for heat exchange tube with wire coil internally installed[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, **34**(5): 5–10. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2014.05.002