

EAST-NBI 偏转磁体线圈水冷能力分析 与测试研究

赵祥学^{1,2} 王 艳¹ 梁立振¹ 胡纯栋¹ 韦江龙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 偏转磁体是中性束注入器的关键部件之一,它安装在中性束注入器真空室内部。为适应核聚变研究装置对中性束注入器高能量、长脉冲、稳态运行的要求,对其偏转磁体原先励磁线圈的水冷系统进行了分析,提出增加水冷抽头的方法完成了改进设计,并对改进前后线圈的冷却能力进行了实验测试。测试结果显示,当中性束注入器长脉冲稳态运行时,改进后的水冷结构能及时带走偏转磁体励磁线圈产生的热量;冷却水的进出口水温差约 21 °C;偏转磁体线圈导体表面的温度约 45 °C;改进设计水冷系统性能得到优化,满足了 EAST-NBI 高参数、稳态运行的要求。

关键词 中性束, 偏转磁体, 励磁线圈, 结构设计, 实验测试

中图分类号 O532+.26

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.120202

中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热是对托卡马克等离子体的外部加热和维持的主要手段之一^[1-3],它利用注入的高能中性粒子束在等离子体中的电离、热化,把能量转化成等离子体的内能来提高等离子体温度。先进实验超导托卡马克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)将建设两条中性束注入束线,从而满足其稳态、高参数运行的需要。

中性束注入器是一套用来产生高能带电粒子并进行中性化的设备。它产生高能中性束的过程是:离子源的灯丝发射热电子,热电子在离子源弧室和工作气体分子碰撞产生源等离子体。源等离子体中的离子被高压电极引出并且加速到所需要的能量后,再经过中性化室,变成高能中性粒子。由于经过中性化室的离子不能全部变成中性粒子,未被中性化的离子称为剩余离子,其必须从粒子束中剥离。这是因为受托卡马克装置约束磁场的影响,剩余离子难以注入到托卡马克等离子体芯部,它将沉积在托卡马克等离子体的边缘,进而为托卡马克第一壁带来大量的热量,并给等离子体带来污染。因此,剩余离子必须由中性束注入器的偏转系统剥离出束通道。剩余离子的偏转可以采用电偏转和磁偏转,EAST-NBI 中性束注入器采用了 180° 磁偏转结构,

它主要由偏转磁体和离子吞食器构成,其布局如图 1 所示。当粒子束经过偏转磁体产生的匀强磁场时,中性粒子不受磁场力的作用,不改变运动状态。带电粒子在恒定磁场中受到洛伦兹力的作用,运动方向发生改变,被剥离出粒子束,最终被离子吞食器捕获。经过偏转磁体剥离带电粒子后的高能粒子束即是中性束,注入托卡马克对等离子体进行加热。

$$F = Bqv = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

$$r = (mv)/(qB) \quad (2)$$

式中, F 为离子受到的洛伦兹力; B 为磁感应强度; q 为离子的带电量; m 为离子的质量; v 为离子的运动速率; r 为离子运动轨迹的半径。

在中性束注入器长脉冲稳态运行的情况下,偏转磁体线圈励磁电流产生的热量必须及时被冷却水带走,否则会危及偏转磁体的安全运行。对偏转磁体水冷结构的优化设计和测试,是偏转磁体正常工作的基础。本文在偏转磁体线圈基本结构参数的基础上,计算线圈进、出口冷却水参数和线圈表面升温情况,在综合考虑经济与性能等因素的基础上,优化了线圈冷却水结构,确保该线圈能够满足 EAST-NBI 装置稳态运行要求。

国际磁约束核聚变能发展研究专项基金(No.2013GB101000)资助

第一作者: 赵祥学, 1967 年出生, 2009 年于中国科学技术大学获硕士学位, 从事中性束注入器束传输特性研究

通讯作者: 梁立振, E-mail: lzliang@ipp.ac.cn

收稿日期: 2014-05-13, 修回日期: 2014-09-12

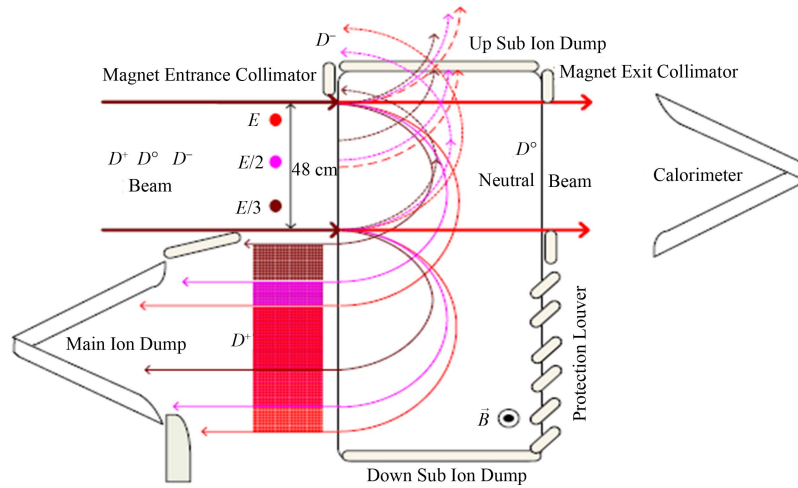


图1 剩余离子偏转系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of residual ions deflection system of EAST-NBI.

1 EAST-NBI 偏转磁体线圈结构

EAST-NBI 一条束线具有两个束流通道, 且两束流以 $8^{\circ}40'$ 的夹角向会聚方向传输。考虑剩余离子 180° 偏转的要求以及 H 型二极电磁铁具有场型对称, 适合于高场区工作的特点, EAST 中性束注入器偏转磁体采用组合 H 型二极电磁铁设计结构较为合适。即两个束流通道分别具有独立的 H 型偏转磁铁, 两偏转磁铁共享一个边铁轭。

根据偏转磁体励磁要求, 结合工程实践的实际情况, EAST-NBI 偏转磁体线圈导线选用 $9.3 \text{ mm} \times 9.3 \text{ mm} \times \phi 6.5 \text{ mm}$ 的空心导体。根据二极磁体对称设计的原则, 将其设计为每侧 2 饼, 每饼 2 层, 每层 8 根的串联结构, 单个线圈导体总长度约 120 m。为满足偏转磁体各导线间的绝缘需要, 导线外侧需裹覆两层宽 25.4 mm, 厚度分别为 0.13 mm、0.05 mm 的玻璃丝膜和聚酰亚胺膜。线圈的引线采用外圆内圆的焊接连接结构, 以方便电源和冷却水路的接入。

当中性束注入器在长脉冲稳态运行情况下, 偏转磁体励磁线圈的发热功率约为 10 kW 量级, 会产生大量的热导致线圈温度升高。过高的线圈温升, 会改变励磁线圈的负载特性, 甚至会损坏线圈导体的绝缘层, 危及磁体安全运行。由于偏转磁体工作在高真空系统内, 偏转磁体线圈产生的热量必须使用冷却水及时带走。EAST-NBI 偏转磁体励磁线圈是利用外方内圆的无氧铜管导体绕制的, 导体中间圆管道内通有循环冷却水, 带走励磁线圈通电时产生的热量。效率高、运行可靠的冷却水系统是偏转磁体安全工作的基础。

2 线圈水冷参数计算

2.1 初步设计线圈冷却能力计算

初步设计一饼线圈设置一个冷却水进口和一个冷却水出口, 其结构如图 2 所示。在 NBI 长脉冲稳态运行的条件下, 以偏转磁体励磁电流 500 A, 线圈电阻 0.047Ω , 冷却水压力为 0.65 MPa, 冷却水流量为 $0.172 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 冷却水进口温度为 20°C , 可以计算出冷却水出口温度。

当 EAST-NBI 处于稳态运行情况时, 可以认为单位时间内线圈励磁电流产生的热量与单位时间内冷却水带走的热量相等, 根据热平衡方程^[4]:

$$I^2 R = c_p m (t_o - t_i) \quad (3)$$

式中, I 为励磁线圈通过的电流强度; R 为励磁线圈的电阻; c_p 为冷却水的比热容; m 为冷却水的流量; t_i 为冷却水进水温度; t_o 为冷却水出水温度。以上文所述数据代入式(3), 可得冷却水出水口温度为 79°C 。

这个温度已经接近线圈绝缘材料的所能承受温度的最大值。为避免线圈的温升可能对绝缘材料造成的损坏, 必须设法减小冷却水温升。

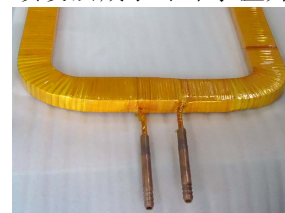


图2 初步设计线圈水冷结构

Fig.2 Preliminarily designed cooling structure.

2.2 改进线圈的冷却能力计算

为了适应 EAST-NBI 中性束注入器高功率、长脉冲、稳态运行的要求,必须解决初步设计线圈冷却水温升过大的问题。降低冷却水的温升可以考虑不改变线圈水冷结构,增大冷却水供水压力,从而增大冷却水流速,增强冷却效果。这种方法势必对冷却水供水系统提出更高的要求,增加投入。也可以考虑不改变冷却水供水压力,缩短冷却水通水路径的方法,增加冷却水流速增强冷却效果,从而达到降低冷却水温升的目的。考虑在原冷却通道长度的二分之一处将其一分为二,增加一对冷却水进出口,其电路利用短接铜块仍然保持其串联结构,改进后线圈结构如图 3 所示。



图 3 改进线圈的水冷结构
Fig.3 Improved water cooling structure.

表 1 初步设计线圈和改进前后线圈冷却水压力和流量测量

Table 1 Measurements of cooling water pressure and flow of the preliminarily designed and improved coils.

水压 Water pressure / MPa	初步设计线圈流量 Flow of preliminarily designed coil / t·h ⁻¹	改进线圈流量 Flow of improved coil / t·h ⁻¹	流量增加 Flow increment / %
0.35	0.111	0.159	43.2
0.40	0.121	0.176	45.5
0.45	0.127	0.193	52.0
0.50	0.143	0.213	49.0
0.55	0.154	0.224	45.5
0.60	0.163	0.239	46.7
0.65	0.172	0.252	46.5

由表 1,在相同冷却水供水压力下,增加水冷抽头的线圈的冷却水流量比初步设计结构的线圈的冷却水流量增加了约 50%。

3.2 改进前后线圈的冷却能力对比

3.2.1 线圈电流为 500 A、通电时间为 100 s 时冷却水温升对比

利用水流热量计系统测量了两种结构的线圈在不同通电电流、不同通电时间下线圈冷却水的温升情况。图 4 给出了通电电流同为 500 A、通电时间 100 s 时,初步设计结构的线圈与增加水冷抽头的线

式(3)中代入偏转磁体稳态运行参数,可计算得到线圈冷却水出口温度为:

$$t_o = \frac{I^2 R}{c_p m} + t_i = 41.1 \quad (4)$$

NBI 在稳态运行时,线圈励磁电流单位时间内产生的热量和冷却水单位时间内带走的热量相等,达到平衡状态。冷却水管的厚度仅为 1.4 mm,忽略管壁厚度,认为冷却水出口平均温度近似等于线圈平均温度。该温度不会破坏线圈导体间的绝缘层,磁体在此温度下可以安全运行。

3 励磁线圈冷却能力测试结果

为了确定偏转磁体励磁线圈的性能,初步设计结构的线圈和增加水冷抽头的线圈均在中性束综合测试台开展了相关测试。

3.1 励磁线圈通水性能测试

初步设计结构的线圈和增加水冷抽头的线圈按照实际工况要求连接到冷却水系统,并分别测量了供水压力由 0.25 MPa 增至 0.65 MPa 情况下冷却水流量大小。其测试结果如表 1。

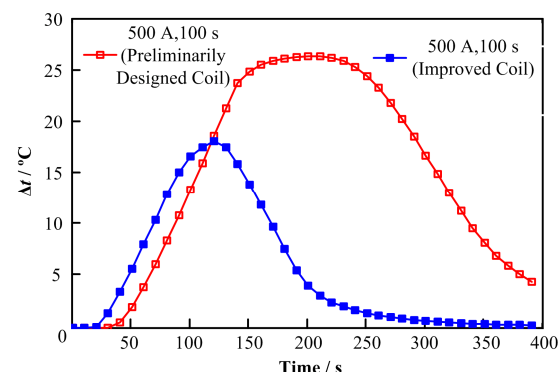


图 4 改进线圈与初步设计线圈通电时间和冷却水温升
Fig.4 Cooling water temperature rise of improved coil and the preliminarily designed coil.

圈冷却水温升随时间变化情况。由图 4, 初步设计结构的线圈热量从线圈内带出时间相对滞后, 且增加抽头的线圈冷却水的温升较低, 带走热量较快。初步设计结构的线圈冷却水在放电结束后两倍放电脉冲时间内还在缓慢升高, 而增加水冷抽头的线圈冷却水温升在放电结束后在约 0.2 倍的脉冲时间内上升, 然后就开始迅速下降, 且其冷却水温度下降的速度也比改进前的线圈冷却水温度下降加快。

3.2.2 放电电流为 500 A 长脉冲放电时线圈冷却水温升

为了确定线圈冷却能力, 利用水流热量计系统对初步设计结构的线圈和增加水冷抽头的线圈在运行电流 500 A 的情况下进行了长脉冲测试。初步设计结构的线圈在放电时间增加至 200 s 后引冷却水出口水温过高而中止了更长脉冲的测试。增加水冷抽头的线圈在通电电流为 500 A 情况下进行了 100 s、130 s、200 s、500 s、1 000 s 通电测试, 其测试结果如图 5 所示。由图 5, 当通电时间大于 500 s 时, 增加水冷抽头的线圈冷却水的温升速率变缓, 通电时间大于 500 s 后增加水冷抽头的线圈冷却水的温升基本保持不变; 此时, 冷却水温升约 21.5 °C。说明励磁电流的热功率与单位时间内冷却水带走的热量达到动态平衡, 冷却水温升保持不变, 这也与理论计算结果符合得很好。

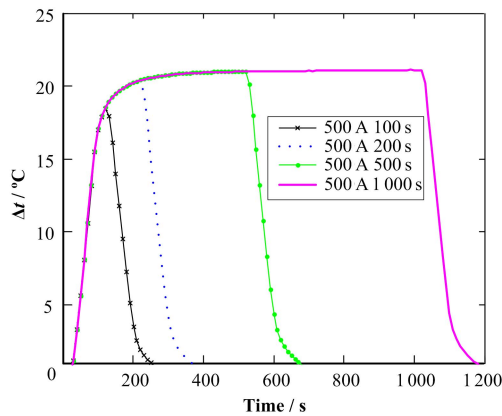


图 5 改进线圈长脉冲冷却水进出水温度差
Fig.5 Improved coil long pulse when the cooling water inlet and outlet temperature difference.

3.2.3 初步设计线圈和改进线圈冷却水温升红外图像对比

在初步设计结构的线圈和增加水冷抽头的线圈通电测试时, 利用红外相机分别拍摄了它们的图像(图 6 和图 7)。图片显示, 线圈冷却水在进出口, 水温有明显差异。对应初步设计结构的线圈和增加水冷抽头的线圈, 红外摄影仪显示的冷却水出口线圈表面温度分别约为 50 °C、30 °C, 与计算结果一致。

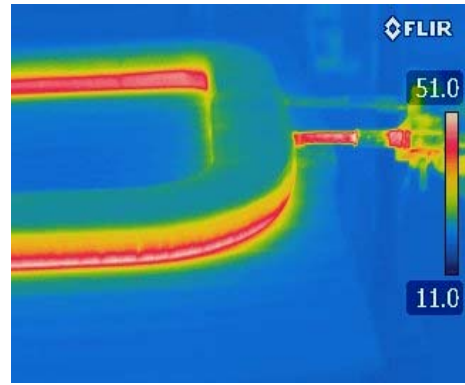


图 6 初步设计线圈通电时的红外成像
Fig.6 Infrared image of the preliminary design of the coil.

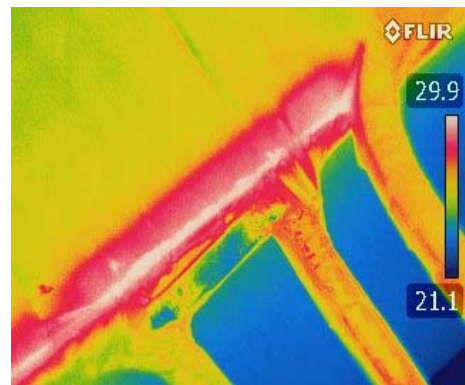


图 7 改进线圈通电时的红外成像
Fig.7 Infrared image of the cooling structure of improved coil.

4 结语

只对初步设计线圈的水冷结构改进, 偏转磁体其它部分不做任何改动, 线圈的冷却能力得到明显增强。这种改进在工艺技术上容易实现, 又可以节约经费。该水冷结构的偏转磁体即可满足 EAST-NBI 中性束注入器在高功率、长脉冲、稳态运行的要求。

在相同电流和脉冲时间情况下, 改进后线圈的冷却水温升明显低于原线圈的冷却水温升。在大电流、长脉冲的情况下, 增加水冷抽头的线圈冷却水温升比原线圈冷却水的温升下降更加明显。并且, 在放电结束时, 线圈恢复到初始温度的时间也比初步设计线圈减少。

根据 NBI 束能量和偏转磁体线圈电流之间的关系^[5], 当束能量为 80 keV 时, 对应的偏转磁体的电流为 361 A。如果 NBI 以此束能量下做长脉冲运行, 冷却水的温升应小于 21 °C。可见, 改进后的线圈冷却能力能够满足 EAST-NBI 中性束注入器高功率、长脉冲、稳态运行的要求。

致谢 本工作得到中国科学院等离子体物理研究所 EAST-NBI 组成员的指导帮助, 在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Liang L Z, Hu C D, Xie Y L. Calculation of beam intensity distribution for the neutral beam injection in EAST[J]. Plasma Science and Technology, 2011, **13**(4): 502–505
- 2 梁立振, 胡纯栋, 谢远来. 中性束再电离损失过程碰撞电离截面特性研究[C]. 中国物理学会 2008 年秋季学术会议, 济南, Sep.19–21, 2008
LIANG Lizhen, HU Chundong, XIE Yuanlai. The characteristics of cross section of collision loss process of neutral beam ionization[C]. Chinese Physical Society 2008 Fall Meeting, Jinan, Shandong, China, Sep.19–21, 2008
- 3 Hu C D, Liang L Z, Xie Y L, *et al.* The calculation of beam intensity distribution for EAST-NBI[C]. 9th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Dalian, Liaoning, China, Oct.11–16, 2009
- 4 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 197
- 5 梁立振. 中性束注入器磁偏转系统束传输特性研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2011: 106–107
LIANG Lizhen. The study of beam transmission in magnetic deflection system for neutral beam injector[D]. Hefei: Institute of Plasma Physics China, 2011: 106–107

Analyses and tests of cooling capability of EAST-NBI deflection magnet coils

ZHAO Xiangxue^{1,2} WANG Yan¹ LIANG Lizhen¹ HU Chundong¹ WEI Jianglong¹

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: The deflection magnet is one of the key components of the neutral beam injector, it is installed in the neutral beam injector vacuum chamber. While the neutral beam injector works, the heat generated by current running through exciting coils of deflection magnet must be taken away by the cooling water simultaneously.

Purpose: In order to meet the requirements of the developing nuclear fusion researches, the neutral beam injector must work steadily, providing neutral beam of high energy, high power continuously. The cooling abilities of the deflection magnets must be enhanced. **Methods:** The water cooling structure of excitation coils of the original deflection magnet was optimized by adding a pair of water taps in each primary coil, and the tests were made to check the cooling capabilities of the improved exciting coils. **Results:** When the neutral beam injector runs at the state of long pulse, improved water cooling structures take away the heat generated by the exciting coils timely. The improvement of the cooling abilities of the coils was successful. **Conclusion:** The temperature difference between the inlet and outlet of the cooling water pipe is about 21 °C, and the surface temperature of deflection magnet coil is about 45 °C.

Key words Neutral beam, Deflection magnet, Exciting coils, Structural design, Experimental tests

CLC O532+.26