

面向 EAST 装置长脉冲高参数等离子体运行的 真空系统性能提升

左桂忠¹, 元京升^{1,2}, 庄会东¹, 余耀伟¹, 陈跃¹, 曹斌¹, 侯吉磊¹, 吴金华¹, 黄明¹, 胡建生¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 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: 托卡马克核聚变装置真空系统为等离子体放电真空腔室提供良好的真空环境、洁净器壁、实时燃料注入及粒子排出等条件, 直接影响高温等离子体的品质。真空系统作为 EAST 装置的重要组成部分, 包括真空抽气系统、等离子体加料系统、壁处理系统以及测量与控制系统。针对 EAST 装置长脉冲高参数等离子体放电的需求, 对真空系统进行了一系列的升级改造, 包括增加外置低温泵数量、研发大抽速及大容量低温泵、提高加料系统可靠性、增加偏滤器超声分子束注入系统、提高离子回旋射频放电功率 >50 kW 等。通过这些改造, 增加了泵的抽气能力及加料系统的加料能力, 提高了器壁的清洗效果, 使等离子体放电真空室压力达到约 1.5×10^{-6} Pa。真空系统的成功升级, 促进了 EAST 装置, 如 >400 s 高约束模(H模)、1056s 长脉冲等离子体等多项创世界纪录成果的获得, 为未来 ITER 及聚变堆真空系统的设计与运行提供了重要的参考。

关键词: 抽气; 壁处理; 加料; 真空系统; 等离子体

中图分类号: TB753; TL631

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)03-0229-09

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.03.001

Upgraded Vacuum System for Long Pulse High Parameter Plasma Discharge in EAST

ZUO Guizhong¹, YUAN Jingsheng^{1,2}, ZHUANG Huidong¹, YU Yaowei¹, CHEN Yue¹,

CAO Bin¹, HOU Jilei¹, WU Jinhua¹, HUANG Ming¹, HU Jiansheng¹

(1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The vacuum system of Tokamak provides adequate vacuum, clean wall condition, real-time fuel injection and particle exhaust, which directly influences the high temperature performance. The vacuum system, as an important integral part of EAST, includes vacuum pumping system, plasma fueling system, wall conditioning system, vacuum measurement and control system. To realize the targets of long pulse and high parameter plasma discharges for EAST, some upgrades of the vacuum system have been conducted, including increased the number of pumps, increased the pumping speed and capacity of cryopumps, improved the reliability of SMBI and increased new divertor SMBI system to reduce gas injection delay time, increased ICRF cleaning power to >50 kW. Through these upgrades, it increases the pumping capability, improves the effect of wall conditioning, and results in a recorded pressure of 1.5×10^{-6} Pa in vacuum vessel. Based on these upgrades, some record plasmas, such as >400 s high confinement mode (H-mode) and 1056s long pulse plasma are successfully achieved in EAST, which provides a very important reference for vacuum system design and operation for ITER and future fusion reactor devices.

Key words: pumping; wall conditioning; fueling; vacuum system; plasma

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE03130000、2022YFE03100003); 国家自然科学基金(12105322、12105135); 中国科学院青年交叉团队项目

作者简介: 左桂忠, 博士, 研究员, 主要从事托卡马克等离子体与壁相互作用、真空科学技术研究。E-mail: zuoguizh@ipp.ac.cn

引文信息: 左桂忠, 元京升, 庄会东, 等. 面向 EAST 装置长脉冲高参数等离子体运行的真空系统性能提升[J]. 真空与低温, 2024, 30(3): 229-237.

ZUO G Z, YUAN J S, ZHUANG H D, et al. Upgraded vacuum system for long pulse high parameter plasma discharge in EAST[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(3): 229-237.

0 引言

东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)是中国自主设计建造的国际上第一个成功投入实验运行的全超导托卡马克核聚变实验装置。项目的科学任务是研究稳态先进托卡马克装置所涉及的物理问题,工程任务是建立完全超导托卡马克的技术基础,以支持未来的聚变反应堆^[1]。EAST 装置具有独特的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构三大特性,将更有利于探索等离子体稳态先进运行模式。EAST 三大目标为:产生 ≥ 1 MA 的等离子体电流;等离子体持续时间达到 1 000 s;在高功率加热下温度超过一亿摄氏度^[2]。

真空系统作为 EAST 装置的重要组成部分^[3],包括真空抽气系统、等离子体加料系统、壁处理系统以及测量与控制系统,其运行贯穿于装置实验的全过程,为等离子体放电提供清洁的高真空环境^[4],提供燃料补充,同时实现对杂质及燃料粒子的快速抽除和燃料再循环的控制等^[5]。真空系统不仅是托卡马克装置运行的基本条件,也是直接影响等离子体放电品质的重要因素^[6]。一套高性能且能长期、稳定、高效运行的真空系统,是托卡马克装置运行不可缺少的重要组成部分。

通过多年发展和完善,真空系统有效地保障了 EAST 装置稳定运行。然而,真空系统经过多年的运行,也出现了设备老化,性能滞后等问题,能力已经达到瓶颈,功能、参数和运行模式难以满足 EAST 下一步研究的需要。面向未来高参数(加热功率 >10 MW,等离子体温度 >1 亿摄氏度,H 模),长脉冲(百秒量级以上时间尺度)的等离子体放电,对真空系统提出了更高的要求:需要提供更好的真空、更洁净的器壁条件以应对高功率、长脉冲等离子体运行对第一壁的溅射及烧蚀等,避免杂质产生与聚芯;长时间保持燃料粒子壁滞留与再循环的平衡^[7];提供更大的粒子排除能力及更长时间尺度的粒子平衡^[8];发展多样化的加料及实时壁处理技术^[9],提供先进的等离子体加料^[10]、杂质与热流控制手段^[11]。

本文主要聚焦 EAST 等离子体放电真空室(也称之为内真空室)的真空系统,首先介绍 EAST 真空系统长期运行所面临的问题,以及面向长脉冲高参数等离子体放电真空各个子系统所开展的升级改造,最后给出真空系统性能提升的效果。

1 EAST 真空系统及其面临的问题

EAST 真空系统包含了真空抽气系统、等离子体加料系统、壁处理系统以及测量与控制系统,如图 1 所示。

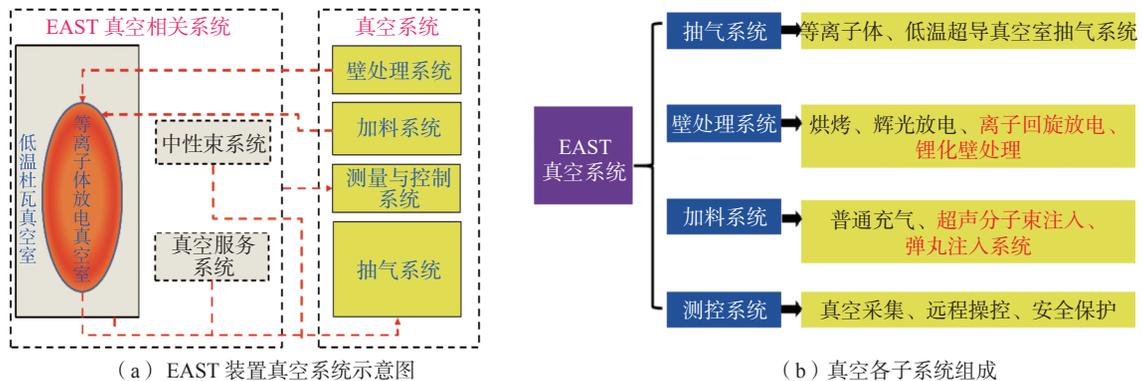


图 1 EAST 真空系统

Fig. 1 The vacuum system on EAST

通过多年发展,抽气系统不仅为等离子体运行提供了超高真空环境,还能够进行有效的粒子排出,以降低等离子体杂质含量。加料系统从最初的普通充气系统,逐步发展了注入深、效率高的超声分子束和弹丸注入系统,提高了等离子体加料效率,还满足不同杂质气体注入的需要,成功应用于等离子体热流控制。发展了与强磁场环境兼容且能长期稳定工作的离子回旋放电系统,逐渐代替传统的直流

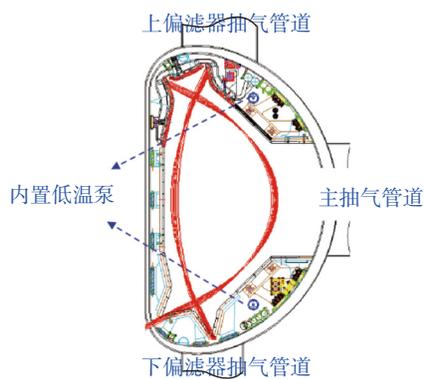
辉光放电系统,提高了粒子清除率,有效降低等离子体杂质水平,并改善燃料粒子再循环。发展了锂化壁处理技术代替硼化壁处理,可以改善粒子再循环,控制杂质产生,降低氢在氦等离子体中含量,提高等离子体加热效率,为高约束模等离子体获得、性能提高与稳态维持做出极大贡献。实时锂壁处理技术的发展,使得长脉冲等离子体运行过程中锂膜得到实时修复,实现长时间粒子与热流控制,改

善等离子体边界强流不稳定性,获得了长时间完全抑制边界局域模的高约束等离子体,瞬态高热负荷被抑制,同时减少了杂质聚芯。这些技术的发展,广泛应用于 EAST 等离子体物理实验研究,在粒子平衡、热流及杂质控制物理机制等研究方面取得了系列创新性成果。

1.1 真空抽气系统问题及危害

EAST 装置等离子体运行需要清洁的超高真空环境和快速的燃料及杂质粒子排除能力。EAST 等

离子体放电真空室抽气系统目前主要采用分子泵、低温泵的混合抽气模式,分子泵主要分布于主抽气管道,而低温泵分散安装在主抽气管道和上下偏滤器区域附近,同时还有两套安装在真空室偏滤器背后的内置式低温泵。改造前 EAST 抽气系统示意图及中平面抽气管道如图 2 所示。改造前 2 台低温泵位于抽气管道上方,同时布置 4 台分子泵,分别位于抽气管道下方。在此种布置下,从低温泵脱落的活性炭将直接坠入下方的分子泵内,可能导致分子泵叶片损伤。



(a) 改造前内真空抽气系统组成



(b) 改造前内真空主抽气管道现场位置

图 2 改造前 EAST 抽气系统布局及中平面抽气管道

Fig. 2 The layout diagram of pumping system and the main pumping tube on EAST before upgrade

改造前 EAST 大多数分子泵采用油封且压缩比较低的国产分子泵,前级均为油封式旋片泵。这种搭配组合在使用过程中很可能会因为使用不当、压缩比过低或者其他故障导致泵油返流,污染等离子体放电真空室。另一方面,大部分泵组均超期运行(10年以上),导致分子泵轴承磨损严重,甚至出现轴承断裂的情况。同时,随着 EAST 装置放电参数的提高所带来的第一壁热负荷的增加,实验过程中高能等离子体可能击穿第一壁水冷回路导致不同程度的水泄漏。这不仅会导致泵油乳化,抽气性能下降,更严重的会使泵体内部受到严重腐蚀,如图 3 所示。应对这些意外事件不仅耗费巨大的人力和物力,而且内真空室破空、除水、除油及后续的真空壁处理耗时较长,严重影响了离子体物理实验进程。因此亟须设计和增加一套有效的抽水泵组以应对此类事故,这不仅有效地保护了真空设备,也有利于确保真空及装置的运行安全。

EAST 所采用的低温泵大部分为装置建设初期配置,虽然每轮实验前后都进行日常维护,但是大部分属于超期服役,由于活性炭老化、污染、脱

落等方面的原因,抽气速率和饱和抽气容量大幅度降低。经过平台测试,老旧低温泵的抽速只有其标称抽速的 1/5。

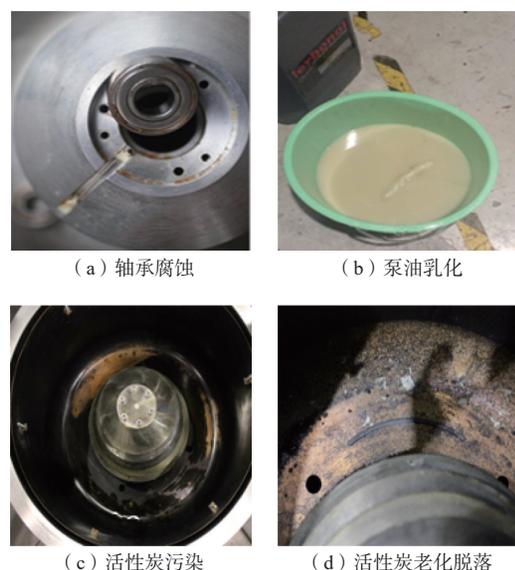


图 3 EAST 低温泵与分子泵常见问题

Fig. 3 Common problems of molecular pumps and cryopumps on EAST

此外,除了上述真空抽气系统的关键抽气设备由于超期服役、意外事件等因素导致性能下降,抽气设备损坏,关键抽气设备与装置连接的大口径插板阀也已经超过其 10 000 次的开关寿命,一些阀门的阀板已经出现变形,此外大部分阀门存在微漏等问题。

1.2 等离子体加料系统问题

EAST 加料系统主要包括普通充气系统(GP)、超声分子束加料(SMBI)以及弹丸注入(PI)三种方式,其中前两种为 EAST 常用的方式。改造前,加料系统极向布局如图 4(a)所示。EAST 装置 A 窗口的 SMBI 系统与中性束注入系统存在相互干涉,

同时, SMBI 系统的脉冲电磁阀由于多次开关容易损坏需要在实验期间更换,原 SMBI 系统结构复杂、体积大、安装空间有限、更换周期长(约 3 天)。另外, SMBI 的脉冲电磁阀有外漏,需改进结构系统,提高系统可靠性。此外, EAST 在偏滤器位置主要通过普通充气的方式对边界热流进行缓解,如图 4(a)所示。普通充气的响应时间比较长,约 600 ms,不能满足实时反馈充气的要求,也无法进行边界热流的主动控制,如图 4(b)所示。未来 EAST 装置边界热流的主动控制是保障其能够进行高功率长脉冲运行的前提条件。

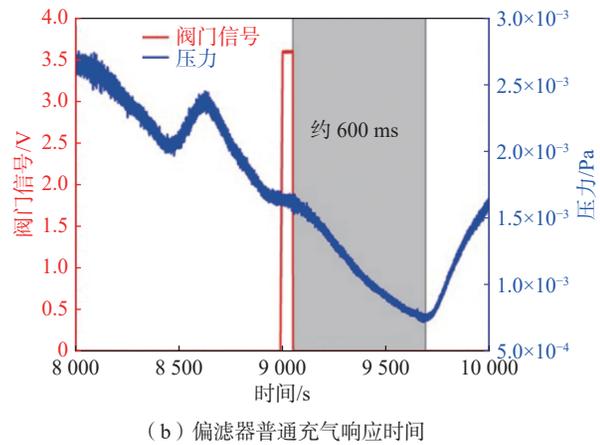
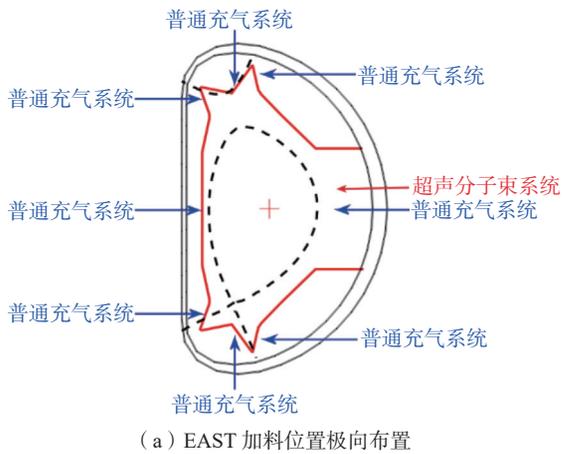


图 4 改造前 EAST 常用加料系统分布与偏滤器普通充气系统的响应延迟

Fig. 4 Fueling system location and response time of gas puffing in the divertor before upgrade on EAST

1.3 壁处理系统问题及危害

EAST 壁处理系统主要包括窗口和管道烘烤系统、直流辉光放电清洗系统、离子回旋放电清洗系统、放电清洗辅助下的硅化和锂化涂层以及实时壁处理系统等。这些系统运行时间过长,系统部件老化严重,比如窗口和管道烘烤系统老化,加热丝经常断裂需要更换,烘烤电源运行超过 13 年,经

常出现跳闸、通讯不畅等故障,而且电力电缆也有许多老化,运行期间存在安全隐患,这导致窗口和管道烘烤能力不足、运行不稳定,难以快速清除真空室内吸附的杂质。离子回旋放电清洗系统如图 5 所示,发射机功率低,射频天线结构单一、散热能力不足,实际运行功率仅为 10~30 kW,清洗等离子体主要集中在低场侧底部,无法满足第一壁全面清洗的需求。

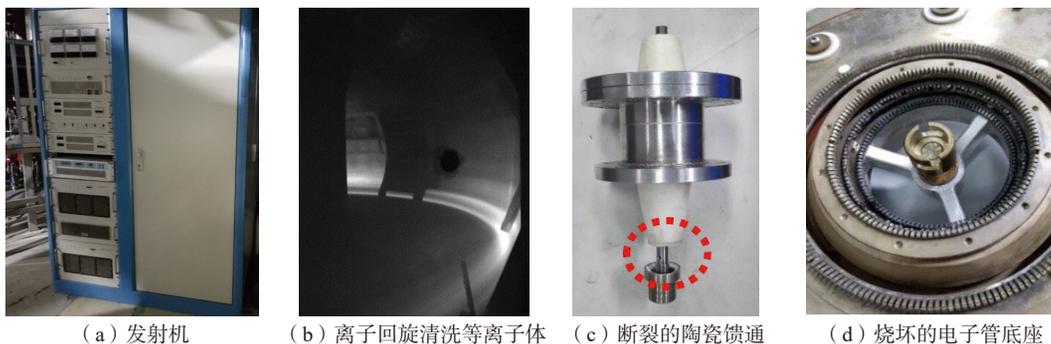


图 5 改造前的离子回旋放电清洗系统

Fig. 5 Ion cyclotron discharge cleaning system before upgrade

此外该系统运行多年已经出现老化现象, 每次维修都需要 3~5 天时间, 影响实验的正常进行, 无法满足实时壁处理的需求。

随着 EAST 装置性能的提升, 对壁处理也提出了更高的要求, 当前的系统难以满足 EAST 物理实验的需求, 必须进行升级改造, 提升壁处理的运行参数和系统可靠性, 以满足 EAST 未来高功率长脉冲等离子体对低杂质水平、低再循环水平的实验需求。

2 真空系统升级改造

2.1 真空抽气系统改造

从 EAST 装置安全方面来考虑, 对这些真空获得设备以及相关配套设备均进行了升级, 以提高抽气系统的安全性和稳定性, 并为未来 EAST 更高参

数等离子体的获得提供高效的粒子排除能力。

2.1.1 等离子体放电真空室主抽气管道改造

改造前 EAST 等离子体放电真空室主抽气管道存在布局缺陷, 4 台分子泵安装在抽气管道下方, 2 台低温泵位于抽气管道上方, 另外 2 台低温泵位于抽气管道前端方形管道下方, 如图 6(a)所示。在此布局下, 管道上部低温泵掉落的活性炭颗粒会对下部的分子泵带来很大安全隐患, 因此将抽气管道旋转 180°, 同时新开 400 mm 口径的低温泵抽气口 2 个, 如图 6(b)所示。改造后, EAST 内真空室主抽气管道上采用磁悬浮分子泵并安装在管道上部, 低温泵则安装在抽气管道下部, 这样在不损失抽速的条件下从根本上避免了隐患的发生, 提高了系统的安全性能。

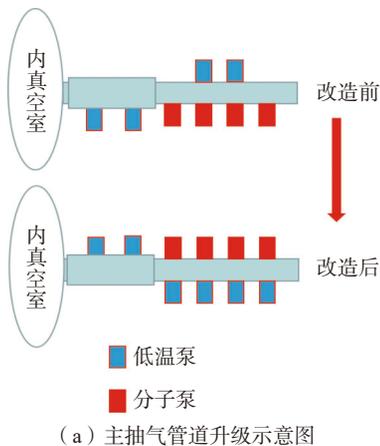


图 6 EAST 内真空室主抽管道升级方案

Fig. 6 Upgrade scheme of the main pumping tube of the inner vacuum vessel on EAST

本次改造, 原主抽气管道上 4 台油封分子泵 (TYFB3600), 全部更换为无油、对小分子气体压缩比更高、抽速更大、全磁悬浮的分子泵, 并用 5 mm 厚的软铁制备完整的磁屏蔽罩, 而且 4 台磁悬浮分子泵 (爱德华 STP-XA4503) 全部采用开口向下倒扣的安装方式, 可以免除安装防护网, 进一步提高了分子泵的抽速, 另外这种安装结构也从根本上避免了掉落的活性炭等颗粒对高速旋转叶片的损伤。新主抽气管道上安装了 6 台高性能低温泵 (住友 CP-16), 极大地提高了 EAST 内真空室抽气管道上低温泵抽气系统的运行稳定性和抽气能力。

通过本次升级改造, 一方面提高了整个抽气系统对小分子气体 (D_2 、He 等) 的抽气能力, 另外一方面也从根本上避免了使用油泵所带来的对真空室的污染。

2.1.2 低温泵障板结构优化

为了满足 EAST 更高参数、更长脉冲等离子体放电的实际需求, 进一步提升 EAST 抽气系统的抽气能力。EAST 研发了大抽速、大容量低温泵, 通过改进低温泵障板结构, 增加流导的同时, 降低小分子气体的反射率, 进而增大低温泵对小分子气体的抽速。通过增大活性炭涂覆质量, 来进一步增加对 D_2 的抽气容量, 并且采用制冷量更高的制冷机来提升二级冷头的制冷量 (从 8 W 增加到 15 W)。经过台面测试, 该低温泵的抽速为 $18 \text{ m}^3/\text{s}$, 对小分子气体 H_2 抽气容量达到 $9.8 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$ (大于同口径进口低温泵抽速为 $12 \text{ m}^3/\text{s}$ 、对 H_2 容量约 $5.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$), 使低温泵的抽气性能得到很大的提升。改造前后低温泵障板结构如图 7 所示。目前, 这两台新研制的大抽速大容量低温泵已经安装在 EAST 的偏滤器位置附近, 经过两轮 EAST 实验运行, 各项性能均正

常,保证了偏滤器区域杂质及燃料粒子及时排出,提高等离子体约束的稳定性。

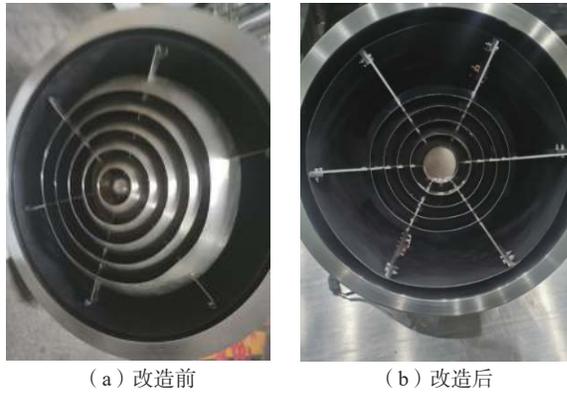


图 7 低温泵改造前后障板结构对比图

Fig. 7 Comparison of baffle structure of cryopump before and after the upgrade

2.1.3 下偏滤器结构优化

在托卡马克装置的等离子体放电过程中,杂质及燃料粒子从芯部向外部输运,经刮削层在磁力线引导下进入偏滤器区域并中性化,偏滤器将中性化后的粒子汇聚收集,并通过粒子排除系统将中性气体实时快速排出等离子体。对于长脉冲等离子体稳态运行而言,偏滤器粒子的高效排除对长脉冲密度的稳定控制至关重要,从而避免等离子体因密度极限而发生破裂。作为托卡马克装置关键部件的偏滤器,包括偏滤器内靶板、偏滤器外靶板以及中间的偏滤器 Dome 板,等离子体的两个内外打击点分别落到偏滤器内靶板和外靶板上,在等离子体放电过程中大量的粒子进入偏滤器区域并中性化,偏滤器将中性化后的粒子汇聚收集。新型的偏滤器增大偏滤器内外靶板与偏滤器 Dome 板之间的间隙,即增加了偏滤器粒子排出通道,当前优化后的粒子排出通道约为 53 mm,比原来的粒子排出通道(28 mm)增大了近一倍,提高了粒子的排出效率。利用 COMSOL 模拟计算了新旧偏滤器区域以及抽气颈管的流导,即在极限真空条件下,设置中平面的气压为 1×10^{-5} Pa (p_m),设置偏滤器管道出口处的泵抽速(S_p)为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟计算得到旧偏滤器和颈管总流导约为 $10.14 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而新的偏滤器,总流导增加到 $13.83 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 8 为偏滤器区域附近结构以及模拟的压力分布。

此外,对偏滤器结构改造前后的下偏滤器抽气系统进行抽速标定,改造后下偏滤器附近抽速提升了约 22%。

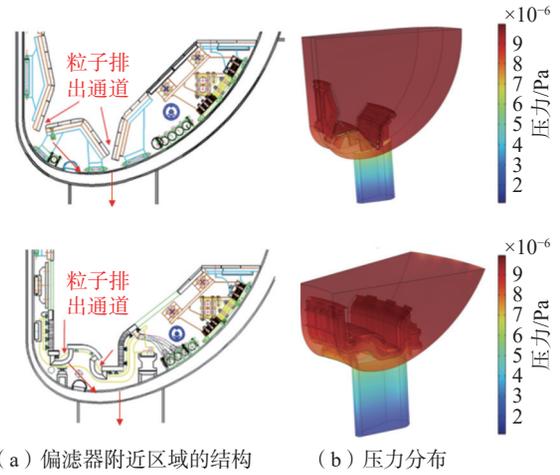


图 8 升级前后偏滤器附近区域的结构示意图和分子流条件下压力分布

Fig. 8 The diagrams of the area near lower divertor and the pressure distribution by simulation before and after the upgrade

通过真空系统的升级,14台低温泵和6台分子泵,2套内置冷泵,将上下偏滤器低温泵、中平面抽气管道的抽气能力提升了约 20%。抽气系统可以提供超高极限真空条件,也能满足 EAST 装置粒子注入速率 $\leq 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的稳态长脉冲等离子体放电的杂质与燃料粒子排除的需求。

2.2 等离子体加料系统改造

通过改造,完成了 EAST 加料系统升级。如图 9 所示,展示了改造之后普通充气系统、超声分子束系统、弹丸注入系统在 EAST 装置不同极向位置的分布。

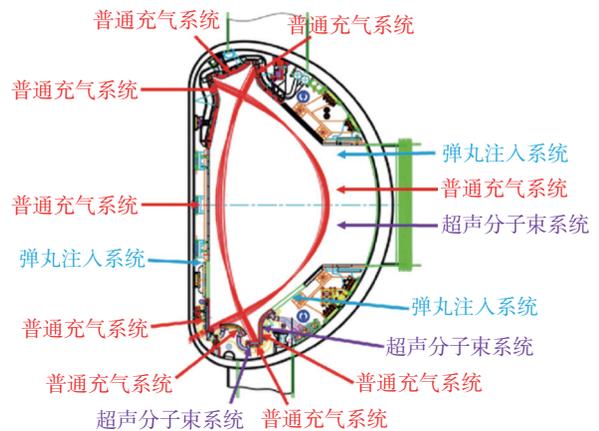


图 9 升级后 EAST 加料系统分布图

Fig. 9 The layout diagram of fueling system after upgrade in EAST

此次改造将水平 A 窗口的 SMBI 系统移到了 C 窗口。并将原来 SMBI 系统脉冲电磁阀的后端

密封结构改为前端密封结构,脉冲电磁阀位于装置外,如图 10 所示。更改密封结构的 SMBI 系统结构更加简单,体积缩小,有利于系统在实验中损坏后进行维护操作(SMBI 系统采用的脉冲电磁阀在实验中会多次反复开启关闭,容易损坏,需要进行更换维护操作)。之前实验中,SMBI 系统的高压气源位于装置现场,通过布置远程供气管道移到了位于装置外侧的高压气源处。在高压气源附近安装了危险气体泄漏警报系统,保障实验期间 SMBI 高压气源的使用安全。

此外,对于普通充气方式响应时间慢,不利于采用反馈控制的方法对偏滤器热流进行有效控制的问题,研发了偏滤器 SMBI 系统以代替普通充气方式,实现在偏滤器位置的快速粒子注入,进而达到对偏滤器热流控制快速响应的目的。偏滤器快速

粒子注入系统由装置内部的注入单元和位于装置外的外围自动补气单元构成。注入单元安装在垂直窗口上,易于操作,真空度满足 EAST 系统接入要求,压力小于 1×10^{-4} Pa,其结构示意图如图 11(a)所示。在注入单元的最前端是拉瓦尔喷嘴,喷嘴位于偏滤器靶板后面,高速粒子运动到此处后经过拉瓦尔喷嘴再次加速,超过声速并最终注入到等离子体中。高压电磁阀位于 EAST 下径管道窗口法兰外面,远离偏滤器强磁场环境,在此处通过安装磁场屏蔽罩避免磁场对电磁阀的干扰,保证电磁阀正常工作。目前在 EAST 安装了 4 套偏滤器 SMBI 注入系统,分别位于下 D 和下 O 窗口外靶板的水平靶板和垂直靶板。如图 11(b)所示,经过测试该系统反应时间约 80 ms,远快于普通充气的反应时间(约 600 ms)。

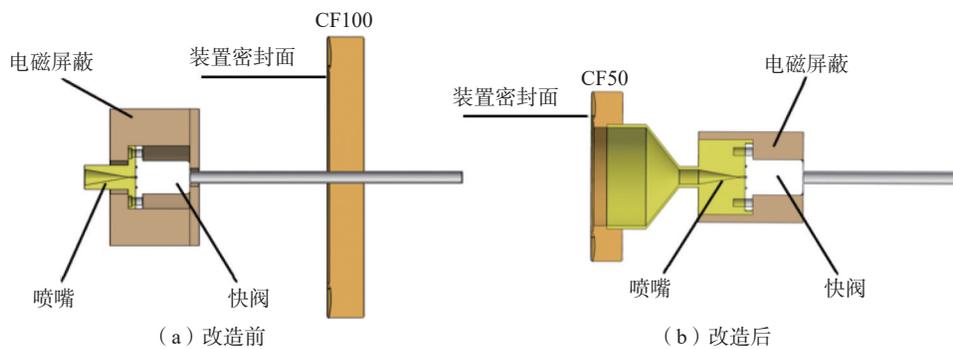


图 10 SMBI 改造前后结构图

Fig. 10 Structure diagram of the SMBI before and after upgrade

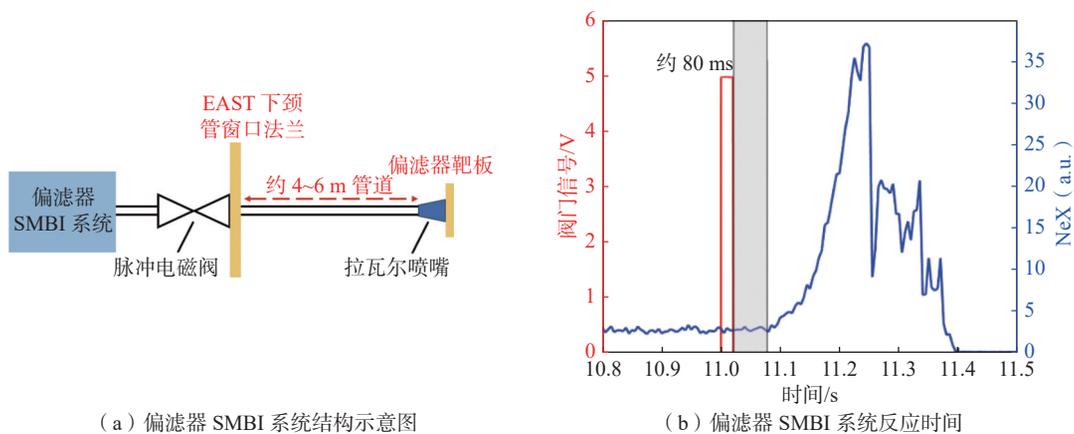


图 11 改造后的偏滤器 SMBI 系统和其反应时间

Fig. 11 SMBI system on the divertors and its response time

2.3 壁处理系统改造

为了进一步提升离子回旋清洗系统的清洗效率以及工作的稳定性,此次升级改造不仅优化升级了原 50 kW 清洗系统,还新增一套 50 kW 清洗系统,

实现两套系统独立、同时运行,提升清洗功率和对杂质的清除效率。同时,系统改造了水冷系统,为发射机提供稳定、可靠的热移除。新增射频功率探测器,实现射频入射功率、反射功率、阻抗、驻波比等

参数的实时测量,指导阻抗匹配调节。升级优化阻抗调配系统,实现反射功率<5%的稳定运行,提升清洗效率。升级真空馈通,将原有陶瓷绝缘材料升级为聚四氟乙烯材料,通过结构优化,提升了绝缘性能和机械强度,同时也保证了足够的真空密封性能。改造后的离子回旋清洗系统运行状态如图 12 所示。

3 真空系统性能提升效果

3.1 真空系统升级效果

EAST 真空系统经升级改造后已经服役了两轮 EAST 实验,各项性能指标得到了很大的提升。

在烘烤处理之后,等离子体放电真空室最小压力持续维持在 5×10^{-6} Pa 以下,并获得了历史最低压力 1.5×10^{-6} Pa。如图 13(a)展示了 2021 年冬季实验放电真空室的压力演化情况,图中 G1.1 为主抽管道远端压力, G1.7 为主抽管道近端压力, TPG15 为放电真空室第一壁温度。如图 13(b)所示,通过每日质谱分析, H_2O 含量已经达到了 $< 2.9 \times 10^{-7}$ Pa 水平。在 EAST 长脉冲放电过程中,所有低温泵均运行平稳,没有出现饱和情况,为 EAST 高参数长脉冲等离子体的获得提供了高真空、大抽速保障。

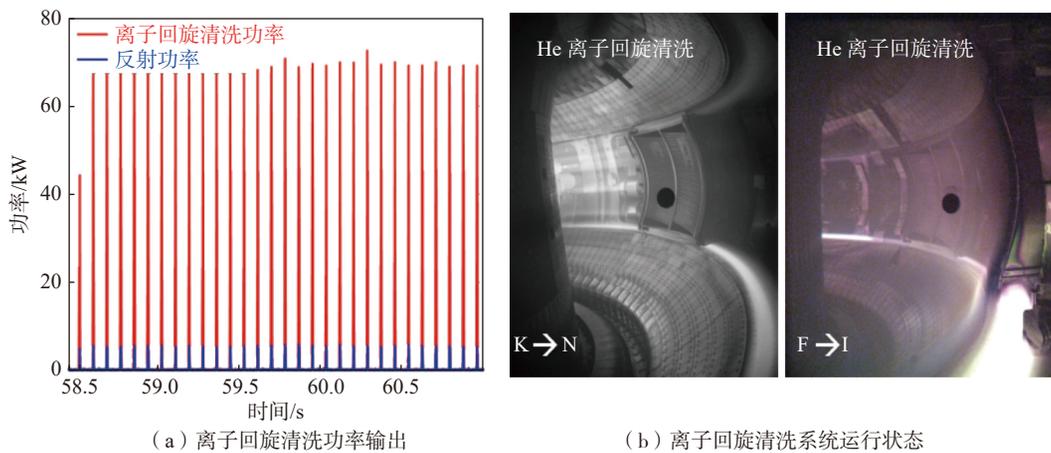


图 12 改造后的离子回旋清洗系统

Fig. 12 the ion cyclotron cleaning system after upgrade

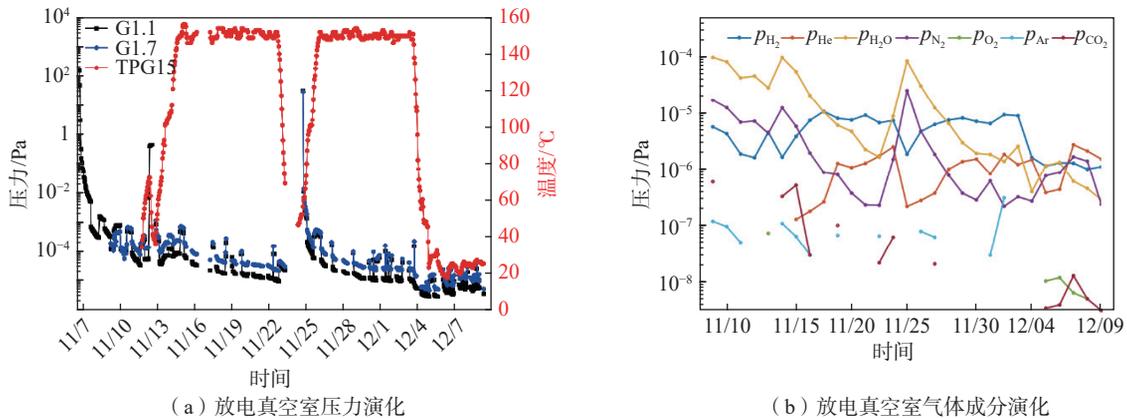


图 13 EAST 2021 年冬季放电真空室真空环境

Fig. 13 Vacuum condition in the vacuum vessel of plasma discharge on EAST in the winter campaign of 2021

对于新研制的偏滤器 SMBI 注入系统通过内置阀门和差压控制有效解决了进气延迟过大的问题,实际测试和运行中,其响应时间稳定在 25 ms。对于升级后的壁处理系统,两套离子回旋系统同时运行可以实现超过 70 kW 的稳定射频放电清洗高

功率,功率反射控制在 5% 以下,这些升级满足长脉冲稳态等离子体放电超高真空环境、粒子清除、再循环控制的需求。

3.2 真空系统升级助力高参数长脉冲等离子体获得 EAST 装置改造前的等离子体放电脉冲长度

相对较短, 主要受限于装置真空度、器壁条件、加料及粒子排除能力等, 而长脉冲(>100 s)稳态高约束等离子体放电是 EAST 下一阶段的主要目标, 改造后的真空系统获得了更清洁的真空环境, 更强大的粒子排出能力以及更精准粒子注入反馈调节, 为 EAST 长脉冲高参数等离子体放电获得提供技术支持。如图 14 所示, 展示了 >400 s 长脉冲等离子体放电获得。通过真空系统的性能提升, 有效地促进了 EAST 装置百秒亿度、四百秒 H 模及千秒长脉冲等多项创世界纪录成果的获得。

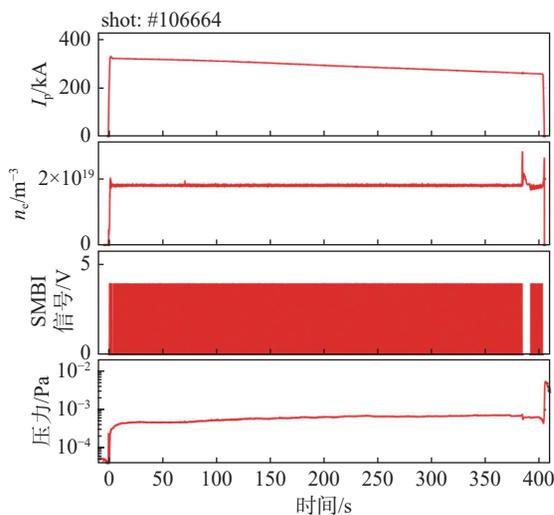


图 14 长脉冲(>400 s)等离子体放电

Fig. 14 Long pulse(>400 s)plasma discharge

4 总结

为了满足磁约束聚变装置长脉冲、高参数等离子体运行高真空、加料及粒子排除的要求, 开展了 EAST 装置的真空系统的升级改造。真空系统的各子系统硬件升级获得了性能的显著提升: 真空抽气系统通过内真空主抽管道的优化, 高性能真空泵的使用, 获得了 EAST 历史上最小压力为 1.5×10^{-6} Pa; 等离子体加料系统优化了 SMBI 系统设计, 提高了系统的运行可靠性; 此外研发了偏滤器 SMBI 注入系统, 其响应时间稳定在约 80 ms; 壁处理系统通过升级离子回旋清洗系统, 实现超过 70 kW 的稳定射频放电清洗高功率, 功率反射控制在 5% 以下。通过真空系统性能的提升, 获得了更洁净壁条件, 实现了更精准等离子体加料以及更稳定的真空系

统运行, 助力 EAST 装置长脉冲 H 模等离子体获得, 并创下了多次世界纪录。同时, 升级后的真空系统也为更高参数、更长脉冲的等离子体放电运行提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 万宝年, 徐国盛. EAST 超导托卡马克 [J]. 科学通报, 2015, 60(23): 2157-2168.
- [2] 万宝年, 徐国盛. EAST 全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展 [J]. 中国科学, 2019, 49(4): 43-55.
- [3] HU J S, WANG X M, LI J H, et al. Vacuum and wall conditioning system on EAST[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2009, 84(12): 2167-2173.
- [4] 李加宏, 胡建生, 王小明, 等. EAST 超导托卡马克装置真空抽气系统 [J]. 真空, 2010, 47(1): 11-14.
- [5] YU Y W, HU J S, ZUO G Z, et al. Control of hydrogen content and fuel recycling for long pulse high performance plasma operation in EAST[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(12): 126036.
- [6] HU J S, CAO Z, ZUO G Z, et al. Progress of engineering design of CFETR vacuum systems[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2022, 177: 113058.
- [7] YU Y W, HU J S, CAO B, et al. Fuel recycling and natural density in EAST H-mode discharges[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 463: 1096-1099.
- [8] LI C L, ZUO G Z, MAINGI R, et al. Deuterium retention characteristics in Li film by coating and during flowing liquid Li limiter operation in experimental advanced superconducting Tokamak[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2021, 63(1): 015001.
- [9] SUN Z, DIALLO A, MAINGI R, et al. Suppression of edge localized modes with real-time boron injection using the tungsten divertor in EAST[J]. *Nuclear Fusion*, 2020, 61(1): 014002.
- [10] HOU J, CHEN Y, YUAN X, et al. Construction and experimental tests of the high frequency pellet injection system on EAST Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 153: 111482.
- [11] CAO B, BI H, YU Y, et al. Development and implementation of divertor fast particles injection for EAST Tokamak [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2022, 178: 113101.

(责任编辑: 郭云)