

EAST 真空室内部部件安装的基准环设计与分析

陈长琦¹ 徐厚昌^{1*} 姚达毛² 秦 织² 陈文革²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Design of D-Shaped Based Ring for Installing Components in Non-Standardized Vacuum Chamber of Experimental Advanced Superconducting Tokamak

Chen Changqi¹, Xu Houchang^{1*}, Yao Damao², Qing Zhi², Chen Wenge²(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;)
(2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract The D-shaped stainless steel base ring has been successfully designed and built, to install various vacuum components in the large non-standardized vacuum chamber of the experimntal advanced superconducting Tokamak(EAST). Discussions focus on the design considerations of the base ring and its stringent technical requirements, such as very high precision for assembling vacuum parts, heat resistance to high temperature plasma, reasonable tolerance-on-fit against distortion and shear resulting from electromagnetism of HALO current. With this dedicated base ring, we succeeded in constructing the EAST, which generates the steady, very long wavelength pulsed plasma, and which realizes the operation of double-null, high-beta plasma as well as single-null plasma at full current.

Keywords EAST, Vacuum chamber, Inner components, Base ring

摘要 EAST核聚变实验装置是国家“九五”大科学工程项目,是一个具有非圆截面的全超导托卡马克装置,本文主要说明真空室内部部件安装基准与真空室本体相连的过渡件——基准环的设计,及其在 HALO 电流所产生的电磁力等作用下的结构分析。真空室内部部件是安装在基准环上的 EAST 装置主机的重要部件之一,由于直接面对高温等离子体,它们的安装基准即基准环的精度将是非常关键的。基于此分析基准环在环境变化时产生的变形量大小,验证基准环的强度等能否满足要求。介绍变形及装配等带来的不满足精度要求将带来的后果。在后续的实验中成功验证基准环的设计,获得稳态的、极长的长脉冲等离子体,并实现全电流下的双零高 β 和单零高等离子体的运行实验。

关键词 EAST 真空室 内部部件 基准环

中图分类号: TL62*6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7126(2007)04-318-04

EAST 核聚变装置将用来有效地开展稳态、安全、高效的托卡马克核聚变反应基础物理和工程技术问题的实验研究。图 1 为 EAST 核聚变装置的工程结构图。整个装置包括装置主机以及低温、真空、电源及控制、数据采集和处理、波加热、波驱动电流、诊断与公共基础设施等重要子系统,其中装置主机由超导纵场磁体系统、超导极向场磁体系统、真空室及其内部部件、内外冷屏和外真空杜瓦五大部件组成。各部件的安装测量及控制网的建立非常重

要^[1],其精度影响真空室内部部件的安装。

EAST 真空室内部部件包括:偏滤器、被动反馈板、低场侧和高场侧第一壁、内部功能线圈、内置低温泵、电磁测量线圈、RF 清洗天线等。其中,偏滤器、被动反馈板、低场侧和高场侧将直接面对高温等离子体,它们在 EAST 装置运行过程中承担从 0.5 MW/m² 到 2 MW/m² 不同热流密度的热负荷以及电磁力的作用。图 2 为 EAST 装置中真空室内部部件工程结构图。

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: EAST 托卡马克核聚变装置国家大科学工程项目(计投资[1998]1303)

* 联系人: Tel: 13956958955; E-mail: xhcrsd@tom.com

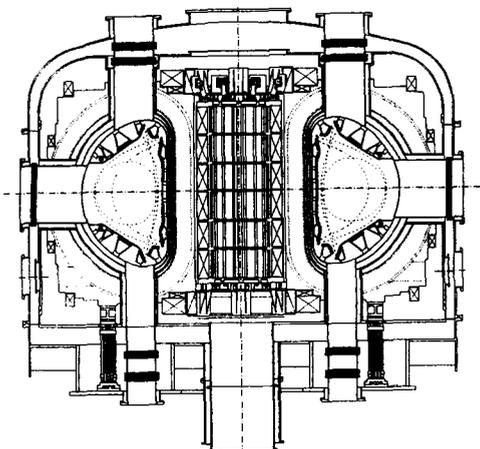


图 1 EAST 装置的工程结构图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of EAST

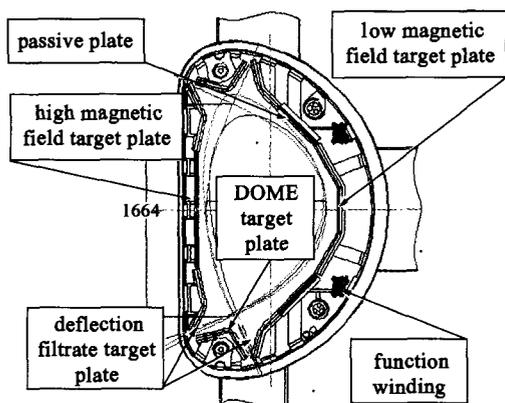


图 2 真空室内部部件工程结构图

Fig.2 Schematic diagram of the component installations in the vacuum chamber

1 真空室内部部件安装基准环设计

1.1 内部部件安装进行准直的必要性

基准环的制造和安装精度要求比较高,此外该结构在受各种电磁力作用后变形值不能超过设计要求。否则,会将造成严重后果:如偏滤器的内、外靶板和 DOME 靶板等在聚变堆中将难以大量排灰、大量的排热,难以控制大量杂质返流进入等离子中等作用,直接导致等离子体的不稳定运行等严重后果;使面对等离子体的靶板上的石墨热载集中,造成局部严重烧蚀;起不到保护真空室内部元器件作用。因此,真空室内部部件安装基准环具有较高精度要求,对其结构进行分析将是必要的^[2]。

1.2 安装的精度要求及设计

充分考虑“D”形真空室的结构特点^[3],在真空室的基础上考虑基准环的设计。EAST 装置的真空

室内部部件安装时,通过基准环,将高场侧、低场侧、偏滤器等部件精确安装到真空室内部,使得这些部件直接构成了面对高温等离子体的第一壁。基准环是沿真空室环体的环向和径向布置的不同宽度的不锈钢环,它们是所有内部部件安装的基准,也是所有内部部件与真空室相连的过渡件。作为安装基准,需要保证其尺寸精度和安装精度。其加工尺寸误差要求:径向误差控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内,其他尺寸误差控制在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以内;各环的中心相对与装置大环中心的同心度要求控制在 $\phi 0.2 \text{ mm}$ 以内,沿环向中心线相对与装置赤道平面的位置误差要求不大于 $\pm 0.5 \text{ mm}$,沿环向中心线所在平面相对于装置赤道面的平行度要求不大于 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。基准环与真空室之间连接采用焊接与销轴结构,并设以尺寸调节功能。

作为内部部件支撑与真空室之间的联接件,基准环要有足够的强度与刚度,承受来自内部部件的各种载荷,保证其作为几乎永久性基准的准确性。基准环从力学角度和保持其位置的稳定性角度来考虑,沿大环方向最好是连续的,但从真空室环向电阻的角度,沿环向不能连续。因此,整个真空室的基准环设计为:在径向布置十六条不连续的环,在环向布置十三条不连续的环。图 3 为 EAST 真空室内部部件安装基准环。

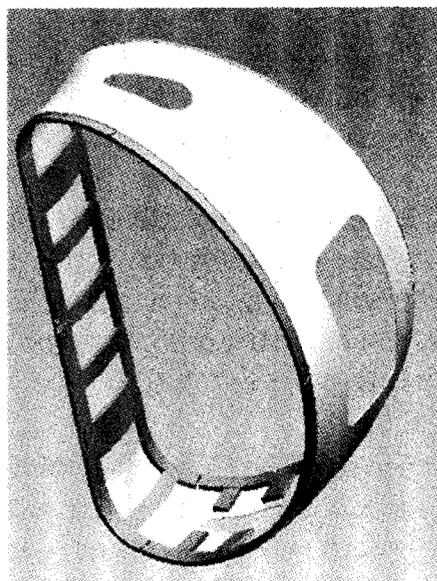


图 3 真空室内部部件的安装基准环

Fig.3 D-shaped base ring for component installation in vacuum chamber

2 真空室内部部件安装基准环的力学分析

2.1 受力分析

真空室内部部件安装基准环在装置运行过程中将受到各种电磁力的作用,这包括:来自 HALO 晕电流作用产生的电磁力以及感应产生的涡电流而引起的电磁力等。HALO 电流是托卡马克偏滤器等离子体位形的特有产物^[4]。当等离子体产生垂直不稳定破裂时,在真空室内部部件以及基准环等硬件结构上存在的 HALO 电流是等离子体电流的 20% ~ 50%,并由此而产生的巨大电磁力,引起真空室的受力变形^[5],增加了真空室内部部件损坏的风险性,同时也是引起基准环产生变形的主要因素。根据前期的分析计算,HALO 电流在真空室内部部件安装基准环的部分区域将产生 150 t 的电动力,这种力垂直作用在基准环的表面上,见图 4。

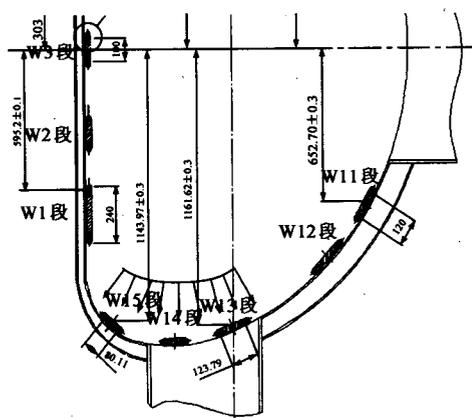


图4 HALO 电流作用的区域(下部标记区域)

Fig.4 The area resulted in the HALO current (where signed in the figure)

根据真空室内部部件安装基准环结构的对称性,取十六分之一段作为研究对象,也就是在不连续的基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段(位置如图 4)将承受 9.375 t 的 HALO 电流所产生的电动力,即在 W13 段、W14 段和 W15 段的表面上将承受 7.18 kg/cm² 的正压力。

在对真空室内部部件安装基准环结构进行力学分析时,采用大型通用有限元分析软件 ANSYS。基准环的 W13 段、W14 段和 W15 段的材料采用 316L 不锈钢,其常温下的材料特性为:弹性模量 E 为 200 GPa,泊松比 ν 为 0.29。在设定边界条件时,可认为真空室本体为绝对刚性。在建立有限元分析模型时,与真空室本体焊接的若干小支撑块与基准环中

W13 段、W14 段和 W15 段采用螺栓连接可简化认为一体。

2.2 受力分析结果

通过不断的分析计算来调整和优化设计,最终确定基准环的 W13 段、W14 段和 W15 段结构的理论尺寸。根据分析可知:(1)对于 W15 段,在 HALO 电流作用下,该段将产生最大的冯·米塞斯为 142 MPa,出现在中间两个支撑块上。最大变形为 0.0712 mm,出现在 W15 段的支撑块之间的中部;(2)对于 W14 段,在 HALO 电流作用下,该段将产生最大的冯·米塞斯为 83.46 MPa,出现在上部支撑块上。最大变形为 0.0405 mm,出现在 W14 段的支撑块之间的中部;(3)对于 W13 段,计算可知,在 HALO 电流作用下,该段将产生最大的冯·米塞斯为 170.3 MPa,出现在上部支撑块上。最大变形为 0.094 mm,同样也出现在 W13 段的支撑块之间的中部,见图 5。

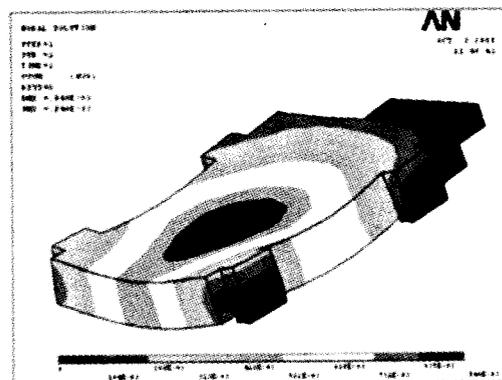


图5 真空室内部部件安装基准环中 W13 变形分布云图

Fig.5 The distortion nephogram of W13 base ring for assembling components in the vacuum chamber

对于 316L 不锈钢,其常温下的屈服限大约为 270 MPa 左右,故真空室内部部件安装基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段结构在 HALO 电流所产生的电磁力作用下,经分析可知,结构是安全可靠的,同时作为基准环,其最大变形是可以接受的。

由于与真空室本体焊接的若干小支撑块与基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段采用螺栓连接,在 HALO 电流作用下,这些段的表面上承受的正压力将通过若干个直径为 12 mm 的螺栓来传递,为此有必要对螺栓进行抗剪能力的校核。表 1 为基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段中螺栓所受的剪应力值。根据计算,基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段中螺

栓将受到不到 50 MPa 的剪应力, 小于 316L 不锈钢其常温下的剪应力屈服限(大约为 140 MPa), 是安全可靠的。

表 1 W13、W14 和 W15 段螺栓所受的剪应力值

Tab.1 The shearing strength of the bolt in W13、W14 and W15

序号	所受的正压力/kg	螺栓数	剪应力/MPa
W13 段	1961	4	43.370
W14 段	1240	4	27.424
W15 段	3003	6	44.276

3 结论

通过以上的逐步验证分析, 得出基准环中 W13 段、W14 段和 W15 段在 HALO 电流所产生的巨大电磁力作用下, 其变形和剪应力符合最初提出的设计要求, 从而为真空室基准环的设计以及其它零部件的安装提供了理论依据, 实现 EAST 全超导托卡马克真空室内部部件的优化设计, 提高设计的效率, 实

现了预期的设计目标。

参 考 文 献

- [1] Chen Wenge, Wu Songtao, Wei Jing, et al. The alignment and assembly for EAST tokamak device. 等离子体科学和技术(英文版)[J]. 2005, 7(5): 3017 - 3020
- [2] 姚达毛. EAST 超导托卡马克偏滤器工程研究[M]. 博士论文, 2005. 10: 111 - 114
- [3] Yao D M, Song Y T, Wu S T, et al. HT-7U vacuum vessel, Fusion Engineering and Design[J]. 2003, 69(1/4): 355 - 359
- [4] 宋云涛, 姚达毛, 武松涛, 等. HT-7U 超导托卡马克装置真空室结构数值分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 68 - 73
- [5] Song Yuntao, Yao Damao, Wu Songtao, et al. Structure analysis and experiment research of the welded bellows for the ports of the HT-7U vacuum vessel, Fusion Engineering, 2002. 19th Symposium on, 19th Symposium on Fusion Engineering (SOFE); Atlantic City, United States, ISBN 0-7803-7073-2: 376 - 379