

# EAST 超导托卡马克核聚变实验装置 真空室窗口烘烤及热应力分析

程亚丽, 鲍立曼, 宋云涛, 姚达毛

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 超导托卡马克核聚变实验装置 EAST 的真空室窗口烘烤系统要求窗口温度达到 150 °C。为选取加热丝型号及确定其合理布局, 采用 ANSYS 有限元分析软件进行热应力分析。分析结果显示, 窗口大部分区域的温度分布及热应力分布较为均匀, 并满足要求, 按照 ASME 压力容器评定标准, 均在安全系数内。同时, 对温度梯度较大的区域提出可行性的附加方案, 以降低可能出现的应力集中。

**关键词:** EAST; 真空室窗口; 烘烤; 热分析

**中图分类号:** TL631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2006)05-0595-04

## Baking System for Ports of Experimental Advanced Super-Conducting Tokamak Vacuum Vessel and Thermal Stress Analysis

CHENG Ya-li, BAO Li-man, SONG Yun-tao, YAO Da-mao

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

**Abstract:** The baking system of Experimental Advanced Super-Conducting Tokamak (EAST) vacuum vessel is necessary to obtain the baking temperature of 150 °C. In order to define suitable alloy heaters and achieve their reasonable layouts, thermal analysis was carried out with ANSYS code. The analysis results indicate that the temperature distribution and thermal stress of most parts of EAST vacuum vessel ports are uniform, satisfied for the requirement, and are safe based on ASME criterion. Feasible idea on reducing the stress focus is also considered.

**Key words:** Experimental Advanced Super-Conducting Tokamak; vacuum vessel ports; baking; thermal analysis

EAST 超导托卡马克核聚变实验装置的真空室是等离子体运行的场所, 由于对真空室的真空度要求较高, 真空室整体需进行烘烤壁处理。其中, 窗口的烘烤是通过在窗口表面缠绕

高电阻率镍铬冷拉合金加热丝进行加热。为选取加热丝型号及确定加热丝布局的合理性, 使窗口温度达到约 150 °C 的温度要求, 本工作设计 EAST 真空室窗口烘烤方案, 并用 ANSYS

收稿日期: 2004-12-02; 修回日期: 2005-10-30

基金项目: 国家“九五”重大科学工程“EAST 超导托卡马克核聚变实验装置”资助项目

作者简介: 程亚丽(1980—), 女, 河南扶沟人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

有限元分析软件进行热应力分析。

## 1 EAST 真空室

EAST 真空室采用非圆截面的双层结构,由内屏蔽层、外屏蔽层以及位于屏蔽层之间的两条筋板组焊成 1 个 1/16 扇形段。真空室内外壁厚度均为 8 mm。根据物理要求,真空室壁上开设水平和上下垂直窗口,用于加热、诊断、抽气、充气 and 冷却等,共有水平窗口、上垂直窗口及下垂直窗口各 16 个。窗口壁厚为 10 mm。为适应装配和热胀冷缩要求,每个窗口颈管上均设计有波纹管。真空室的结构示于图 1<sup>[1]</sup>。

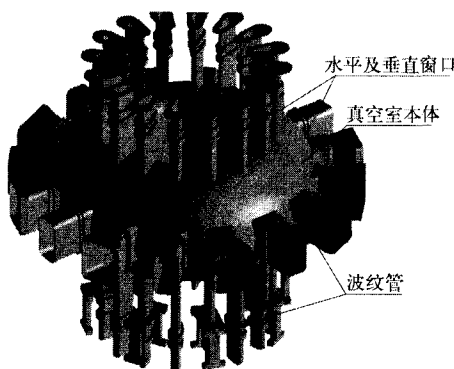


图 1 真空室结构

Fig. 1 Configuration of vacuum vessel

真空室作为超高真空压力容器是 EAST 超导托卡马克聚变装置的关键部件之一,为等离子体放电提供高质量的真空环境。当真空室达到较高真空度时,影响真空度的主要因素已不是真空室内的残余气体,而是等离子体放电时真空室壁面释放的杂质粒子。因此,移除真空室壁面上的残留杂质对获得高度清洁的盛装等离子体容器至关重要。杂质的主要成分水和较轻的碳氢化合物能通过提高真空室温度被轻易移除。所以,真空室烘烤系统成为获得并维持高质量真空环境的有效手段。

## 2 窗口烘烤

真空室烘烤系统对真空室本体和窗口分别采用两种不同的烘烤方案,即热的氮气流烘烤方案和电加热丝烘烤方案<sup>[2,3]</sup>。对窗口所采用的电加热丝烘烤是把高电阻率的 Cr20Ni80 冷拉合金丝缠绕在颈管表面。根据水平窗口与垂

直窗口不同的结构特点,电加热丝采用双螺旋方式分别缠绕在径管的内表面和外表面,利用电加热丝的热传导和热辐射作用对窗口壁面进行烘烤。加热丝布局示于图 2。

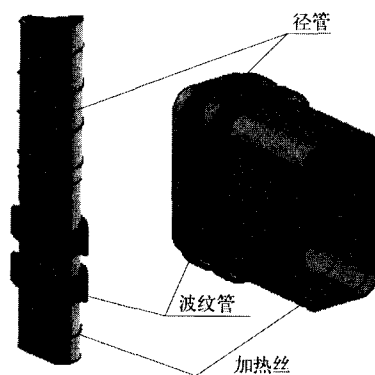


图 2 垂直窗口和水平窗口加热丝布局

Fig. 2 Layout of heaters around ports

窗口由缠绕在其表面的加热丝来加热。水平窗口缠绕在内表面,上下垂直窗口缠绕在外表面。加热丝通电产生的热量一部分用来加热真空室窗口,另一部分则被高于环境温度 25 °C 的真空室对外热交换而损失,包括热辐射及热对流的热量损失<sup>[4]</sup>。当加热丝的生热量等于热辐射损失时,窗口温度达到平衡。

## 3 热分析过程<sup>[5-7]</sup>

真空室窗口的热分析借用大型商用有限元分析程序 ANSYS 进行。

### 3.1 模型的建立

基于真空室的对称性及窗口的相似性,选取 1/16 真空室作为分析对象。在生成网格时,将模型划分为小区域,形成规则区域和不规则区域。对于形状比较规则的区域,采用自动网格。真空室壳体与窗口相贯处的形状复杂,对此,人为指定曲线上的网格数,进行自定义网格划分。图 3 所示为窗口几何模型和有限元模型。

### 3.2 单元、材料特性和实参数定义

EAST 真空室是一种薄壁结构,壁厚远小于部件的整体尺寸。在进行有限元分析时,若将真空室视为一般的三维实体(SOLID)处理,网格划分的难度将大为增加。采用板壳单元模型进行分析不仅可简化分析运算,而且可获得更为准确的分析计算结果。基于此,窗口的有

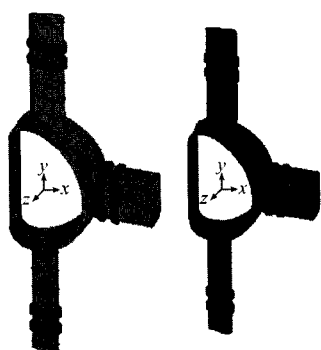


图3 窗口几何模型和有限元模型

Fig. 3 Models for thermal stress analysis

有限元分析采用热分析模块中的薄壳单元(SHELL57)。加热丝的尺寸相对于颈管尺寸小很多,不能在窗口表面建立加热丝模型。加热丝对窗口的加热作用以温度载荷直接加载在加热丝对应于颈管的节点上。

真空室窗口所采用的 316L 不锈钢的材料特性列于表 1,各部分实参数定义列于表 2。

表 1 316L 不锈钢的材料特性

Table 1 Material parameters of 316L

热导率/ (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	对流系数/ (W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	泊松比	弹性模 量/GPa	热膨胀 系数/K <sup>-1</sup>
18.4	10	0.3	196	1.75×10 <sup>-5</sup>

表 2 真空室模型实参数

Table 2 Real parameters of model for vacuum vessel

本体厚度/mm	筋板厚度/mm	颈管厚度/mm	波纹管厚度/mm
8	15	10	0.8

### 3.3 热分析

按照 EAST 装置物理运行要求,真空室窗口温度需达到 150 °C 以上。采用目前的加热丝布置方案,根据实验获得的数据,最高温度可达到 180 °C。因此,在热力学分析时,选取加热丝温度保持为 180 °C 作为边界条件。窗口处于常温状态外真空杜瓦中的部分,表面对 25 °C 周围环境温度产生辐射,其中,波纹管因其结构原因,辐射损失相对较小,分析中忽略不计;窗口端部在外真空杜瓦外的小段处于常温大气中,存在热对流损失。在烘烤过程中,真空室本体温度为 250 °C,当控制加热丝温度处于 180 °C 时,窗口温度分布状况如图 4 所示。图 4 显示,

窗口大部分区域的温度分布较为均匀,满足约 150 °C 的烘烤要求。垂直窗口端部的颈管与外杜瓦法兰相连,端部未缠绕加热丝并与大气对流热交换,相连处出现了最低温度 60.686 °C。在烘烤过程中,必须注意解决这些地方的加热不均匀问题。对端部颈管在大气中的小段,可另外采取其他加热手段,如局部采用加热带,以解决受热不均及可能由此带来的应力集中。

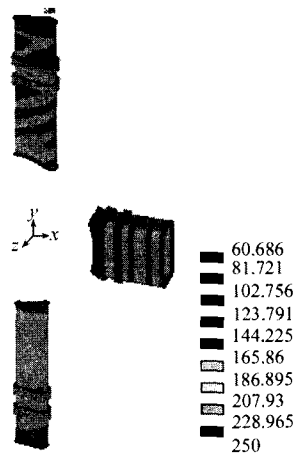


图 4 窗口温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution of port

### 3.4 热-结构耦合分析

热-结构耦合分析采用间接法。将以上温度分析结果作为载荷加载于模型上,且在垂直窗口端部和水平窗口端部与杜瓦相连处的所有自由度予以限制,得到模型的位移分布云图和等效应力分布云图。分析结果表明,最大变形为 10.995 mm,出现在下垂直窗口波纹管处(图 5)。此处的波纹管变形分布示于图 6。最大热应力出现在上垂直窗口上端颈管与波纹管相连处,为 504 MPa(图 7)。

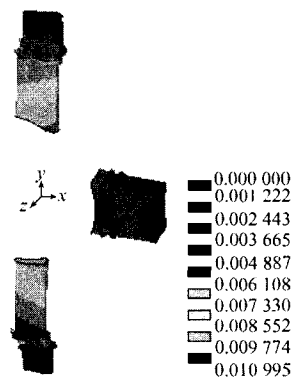


图 5 窗口位移云图

Fig. 5 Deformation of port in nonlinear analysis

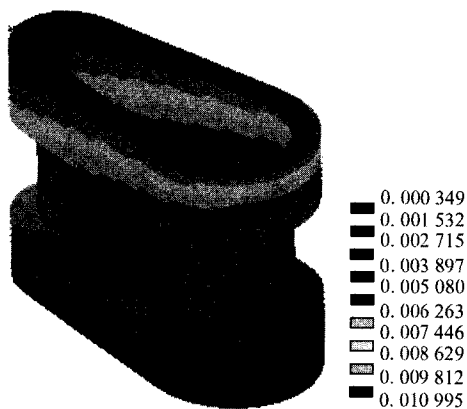


图6 波纹管段位移云图

Fig. 6 Deformation of bellows in nonlinear analysis

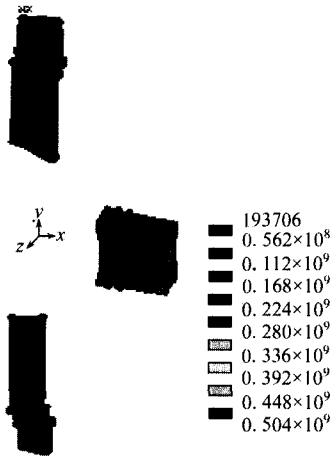


图7 窗口等效应力云图

Fig. 7 Equivalent stress distribution of ports

根据美国 ASME 压力容器评定标准,真空室烘烤时因温度效应引起的热应力属于二次应力,其基本特点是具有自限性,当它达到屈服极限时,只引起局部区域屈服,大部分仍处于弹性状态。这类应力是由于变形受到某种限制所引起的,因此,当应力达到屈服极限时,变形变得较为自由,所受的限制大为减小。所以,局部地区的应力和变形在屈服之后不会继续增加,而是得到一定程度的缓和,因此也称为自限应力。按照 ASME 评定标准,要求真空室热应力与壳壁的薄膜应力和弯曲应力之和不能超过 3 倍材料许用应力<sup>[8]</sup>。从分析结果可看出,窗口整体应力分布极其均匀,热应力值较小。应力集中出现在各窗口颈管端部。引起应力集中的主要原因是由于这些部位在结构上被固定,不属于热应力范畴。实际上,在颈管热膨胀的同时,与之相连的法兰

也将膨胀,因此,热应力值远低于分析值。

#### 4 结论

应用国际通用有限元分析程序对 EAST 托卡马克核聚变实验装置的真空室窗口采用双螺旋缠绕于颈管表面的加热丝烘烤方式进行了热分析,获得了加热丝温度保持在 180 °C 时的温度分布及由此温度所产生的位移变形及应力分布。有限元分析结果不仅为设计工作提供了有价值的分析数据,而且指出了真空室烘烤过程中可能产生的危险区域。对这些区域,需采用附加烘烤方式降低真空室窗口上的应力集中。热分析结果显示,最大应力为 504 MPa,最大位移为 10.995 mm,按照 ASME 压力容器评定标准,它们均处在安全系数内。

#### 参考文献:

- [1] YAO D M, SONG Y T, WU S T, et al. HT-7U vacuum vessel[J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 69(1):355-359.
- [2] HUGUET M, DIETZ K, HEMMERICH J L, et al. The jet machine: Design, construction, and operation of the major systems[J]. Fusion Technology, 1987, 11:43-68.
- [3] ARAI T, MASAKI K, MIYACHI K, et al. Baking technique of JT-60[J]. Vacuum, 1998, 41(10):841-845.
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:130-162.
- [5] SONG Y T, YAO D M, WU S T, et al. Temperature field and thermal stress analysis of HT-7U vacuum vessel[J]. Plasma Science and Technology, 2000, 2(5):443-448.
- [6] 宋云涛. HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置真空室结构仿真分析与实验研究[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所,2001.
- [7] 宋云涛, 武松涛, 姚达毛, 等. HT-7U 托卡马克真空室结构初步设计[C]//第三届全国青年机械工程学术会议论文集. 北京:机械工业出版社, 1998:122-125.
- [8] American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Committee. ASME boiler and pressure vessel code section III, rules for construction of nuclear vessels[R]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1963.