

ITER 水平诊断窗口插件结构分析及优化

金传山¹, 胡庆生², 许铁军², 吴海龙¹, 朱晓文¹, 王旭迪¹

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009 ; 2. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: ITER 水平诊断窗口插件是用于安装可观察和测量等离子体相关参数的诊断设备和仪器的核心部件。窗口插件体积(2×2×3 m)和重量(大于 43 t)均较大且处于悬臂安装状态,在装置运行期间窗口插件将受到较大的电磁力和电磁力矩,结构的强度将受到影响,同时作用在窗口上的载荷将对窗口插件内部集成的光学系统稳定性产生影响,容易造成光路不同。因此窗口插件结构的分析和优化非常重要。本文根据 ITER 组提供的概念化模型建立有限元模型,分析其在受到最大电磁力、电磁力矩及自重情况下对结构的影响。分析结果表明诊断窗口插件屏蔽板(BSM)连接处及提升法兰处均有较大的应力集中,通过改进结构设计进行优化分析后,窗口插件在结构上均能满足强度和变形要求。

关键词: 水平窗口插件;电磁载荷;结构优化;有限元分析

中图分类号:TL631.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0322(2011)01-0068-04

Structural analysis and optimization for equatorial diagnostic port plug of ITER

JIN Chuan-shan¹, HU Qing-sheng², XU Tie-jun², WU Hai-long¹, ZHU Xiao-wen¹, WANG Xu-di¹

(1. Institute of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China ;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The equatorial port plug (EPP) is a key part used for the installation of the diagnostic system/instruments to observe and measure the parameters relevant to plasma. With its big volume (2×2×3m) and heavy weight (over 43t) especially its cantilever-shape in installation, EPP is subjected to great electromagnetic force/torque thus affecting its structural strength. Moreover, the loads acting on EPP will affect the stability of optical system inside EPP so as to be easy to cause different optical paths. The structural analysis/optimization is therefore very important to EPP. According to the conceptual model provided by ITER (international thermonuclear experimental reactor), an FEA model based on the software ANSYS is developed to analyze how the maximum electromagnetic force/torque and gravity of EEP itself affect its structure. The results revealed that the stress is highly concentrated in both the positions where the BSM (blanket shielding module) is joined and the lifting flange is provided. The improved structural design and optimization analysis verified that the EPP structure is available to meet the requirements for both strength and deformation.

Key words: EPP(equatorial port plug); electromagnetic load; structural optimization; FEA(finite element analysis)

核聚变是解决未来能源的主要选择之一,通过高温等离子体研究以实现核聚变为目的。国际热核聚变实验堆(ITER)计划是当今世界最大的大科学工程国际科技合作计划之一,也是迄今我国参加的规模最大的国际科技合作计划^[1-3]。这将是受控热核聚变反应具有里程碑意义的科研合作项目^[4-5]。该项目旨在对基本聚变能技术进行验证,并对实际应用聚变能所需要的条件进行试

验。并将对“燃烧等离子体”方法进行检验。

在高温等离子体核聚变装置中,等离子体状态的测量是非常重要的工作。ITER 水平诊断窗口插件是多项诊断共用的窗口插件,用于安装可观察和测量等离子体相关参数的诊断设备和仪器。等离子体的诊断主要是对等离子体的性质状态以及各种参量(即表征等立体体性质和状态的物理量)的测定,是等离子体实验研究首要解决

收稿日期:2010-08-22

作者简介:金传山(1983-),男,安徽省六安市人,硕士。

通讯作者:王旭迪,副教授。

的问题。等离子体的诊断系统仪器和设备主要集中在诊断窗口插件内部。而 ITER 诊断窗口插件体积(2× 2× 3 m)和重量(大于 43 t)均较大,且处于悬臂安装状态,在装置运行期间窗口插件将受到较大的电磁力和电磁力矩及自重作用。各个方向的电磁力和电磁力矩将对结构产生较大影响,而内部集成的光学系统要求在 ITER 装置运行期间不能有大的变形发生,否则将造成光学系统通路不畅,无法准确进行等离子体的观察测量。结构上满足设计将是最基本的要求,本文从窗口插件结构介绍入手,进而对窗口插件受到的载荷进行分析后利用 ANSYS 软件对诊断窗口插件结构进行分析并优化,以保证结构设计满足 ITER 要求。

1 结构介绍及有限元模型

ITER 诊断窗口插件从概念设计开始就必须考虑其将来的运行环境对结构的影响。ITER 装置运行期间,持续放电中会出现典型的瞬态电磁变化现象,例如快速磁体放电、等离子体破裂和垂直位移事件。这些发生在导体结构中的电磁现象最终会在装置上产生巨大的内部负荷和交互负荷,对其自身的结构要求十分严格。

1.1 结构介绍

水平诊断窗口插件主要由提升法兰、左右侧板、后板和 BSM 板及内部诊断模块组成,其三维构造图见图 1。提升法兰与真空室安全门相连,起到密封和夹持等作用,将支撑整个窗体的重量并承受电磁载荷的作用,侧板、基板和顶板将为屏蔽/诊断模块提供必要的屏蔽、定位和固定等作用,后板起到提升法兰和 BSM 板过渡连接和定位作用^[6-7]。BSM 内部预留光学信号通路,且前端面是第一壁直面对等离子体。诊断窗口插件内部将集成软 X 射线相机、可见和红外视频测量、收集汤姆逊散射测量、氢阿尔法线(H)光谱测量四个子诊断模块,它们主要起到测量和观测 ITER 等离子体软射线辐射空间分布,分析研究 MHD 不稳定型和偏滤器等等离子体参数和运行模式等物理问题。内部集成的光学系统对结构的强度和变形要求较为严格,窗口插件主要尺寸见表 1。

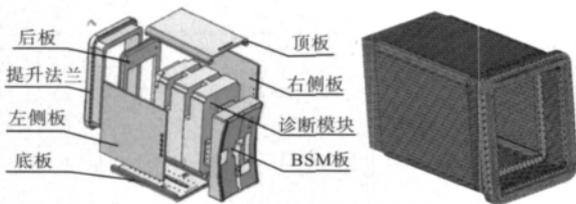


图 1

图 1 窗口插件 3-D 构造图
Fig.1 3-D schematic of EPP

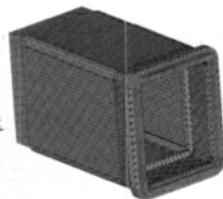


图 2

图 2 窗口插件有限元模型
Fig.2 FEA model of EPP

表 1 窗口插件主要部件尺寸
Table 1 Parameters of main parts of EPP

名称	尺寸(mm)	重量(kg)
提升法兰	2390× 1938× 540	4716
基板	2382× 1708× 181	2319
后板	2160× 1708× 130	1308
顶板	2382× 1708× 181	2268
左、右侧板	2382× 1800× 65	1929
BSM	2100× 1648× 315	9315

1.2 有限元模型

ANSYS 软件提供了多种网格划分工具,可在对实际问题仔细研究后,采用几何体分割等技巧来实现对几何模型有效的网格划分^[8]。在网格划分之前对窗口插件进行简单几何体处理,以便尽可能划分成六面体网格,这样既减少了网格数量又提高了网格质量。诊断窗口插件的模型将在 ANSYS 中直接建立,采用单元类型为 Solid95 和 mpc184 单元,共生成 78423 个单元,其有限元模型见图 2。

2 电磁载荷及边界条件

聚变反应过程中水平诊断窗口插件处在一个复杂的电磁物理场中,特别在等离子体破裂的瞬间,水平诊断窗口插件除了受到自身的重力作用外,更主要的将受到不同方向上的电磁力和电磁力矩的作用。

2.1 电磁理论及载荷

电磁场数值分析是建立在有限元方法基础上,著名的麦克斯韦方程组是研究一切宏观电磁场问题的基础,同时也是电磁场有限元分析的依据和出发点^[9,10]。其微分形式如下

$$\nabla \cdot D = \rho_0 \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\partial B/\partial t \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \times H = J_0 + \partial D/\partial t \tag{4}$$

式中 H ——磁场强度矢量
 B ——磁感应强度矢量
 E ——电场强度矢量
 D ——电位移矢量
 J_0 ——电流密度矢量
 ρ_0 ——自由电荷体密度

由于真空室中等离子体的存在,还需要补充描述电磁物质属性的介质关系:

$$D = \epsilon E, B = \mu H, J_0 = \sigma E \tag{5}$$

式中 ϵ ——介电常数
 μ ——磁导率
 σ ——电导率

在线性、均匀、各向同性的媒质中 ϵ 、 μ 和 σ 都是恒定不变的常数。

利用麦克斯韦方程组可以推导出毕 - 萨 - 拉定律(Biot- Savart- Laplacelaw)

$$B = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \iint J_0 \frac{dl \times (r_2 - r_1)}{|r_2 - r_1|^3} ds \quad (6)$$

式中 J_0 ——电流密度
 dl ——沿电流方向上的向量微分
 r_1, r_2 ——电流源位置矢量和场点位置矢量
 ds ——垂直于电流方向的面积微分
 μ_0 ——真空磁导率
 通过电流密度和磁场强度的矢量积 $J_0 \times B$ 可以得到电磁力

$$F = \iint J_0 \times B dl ds \quad (7)$$

在 ITER 装置运行期间发生等离子体电流淬灭,将在内部结构上感应出电流,环向磁场与电流回路的交互作用引起了强大的径向力矩和极向力矩。窗口插件结构上也感应出极向和环向电流,感生电流与磁场交互作用产生电磁载荷。由 ITER 组提供的电磁载荷^[11],如图 3 与图 4 所示。

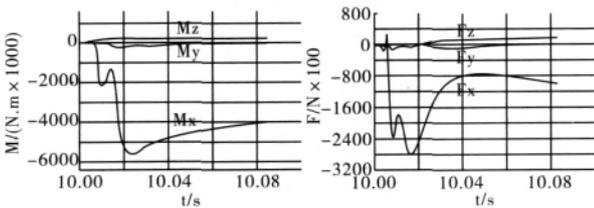


图 3 窗体承受的全部力矩与作用力(开始于第 10s)

Fig.3 Total electromagnetic load on EPP (with a starting time at 10sec)

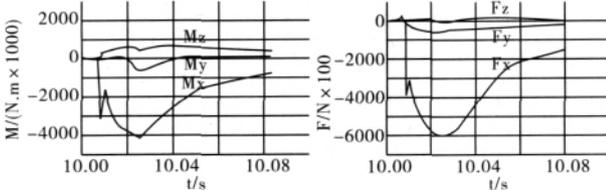


图 4 BSM 承受的全部力矩与作用力(开始于第 10s)

Fig.4 Total electromagnetic load on BSM (with a starting time at 10sec)

系统载荷的定义如下: F 表示作用力, M 表示承受力矩, X 表示径向场, Y 表示极向场, Z 表示纵向场,箭头指向为正方向,力矩方向的确定遵循右手定则。等离子体破裂放电瞬间是一个复杂的物理场变化过程,通过分析图 4 可知从第 10 s 开始,窗体对提升法兰的最大作用力矩约为 5.8 MN·m,径向作用力约为 2.8×10^5 N,极向与

纵向的作用力及力矩可以忽略不予考虑。BSM 板对提升法兰最大作用力矩约为 4.2 MN·m,在径向作用力最大约为 6×10^5 N。极向与纵向的作用力较小,分别为 6×10^4 N 和 1×10^4 N。

2.2 约束条件

在分析计算中约束条件处理的好坏,对计算结果有着重大影响。水平诊断窗口插件将与 ITER 主装置真空室安全门相接,主要通过水平窗口插件提升法兰与安全门螺栓连接,分析计算时约束提升法兰肋内侧面全自由度固定。

3 有限元分析及优化

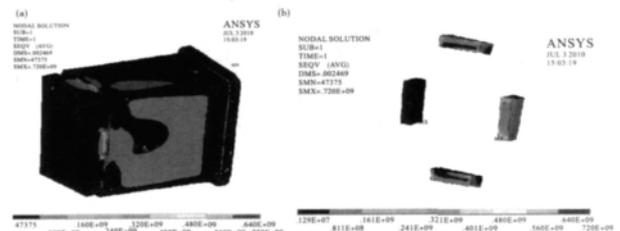
3.1 有限元分析

通过对窗口插件加载电磁力、电磁力矩和自重。加载电磁力矩时利用 mpc184 单元建立刚性梁直接加载。自重以惯性约束的方式施加到结构上,惯性加速度为 9.8 m/s^2 。通过求解静力分析的控制方程,即可求得结构在各节点上位移向量 U 和单元在各节点的应力。静力控制方程如下:

$$[K][U] = [F]$$

式中 $[K]$ ——刚度矩阵
 $[U]$ ——位移向量
 $[F]$ ——载荷向量

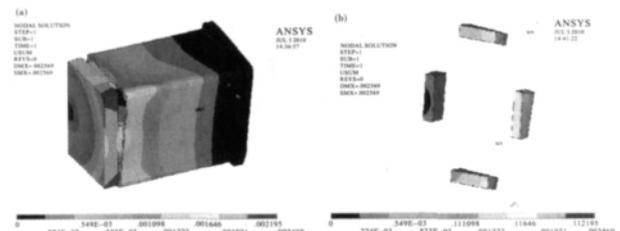
通过求解分析结果见图 5。



(a) 整体应力;(b) BSM 连接处应力

图 5 优化前窗口插件应力

Fig.5 Stress distribution of EPP before optimization (in Pa)



(a) 整体应变;(b) BSM 连接处应变

图 6 优化前窗口插件应变

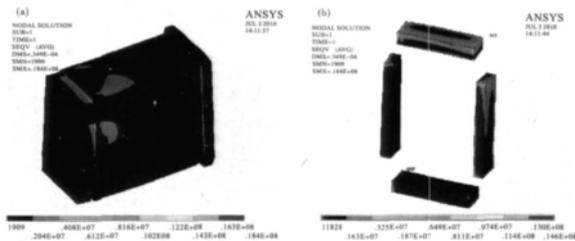
Fig.6 Displacement and strain of EPP before optimization (in meter)

从分析的结果看诊断窗口插件在受到电磁力和电磁力矩及自重的影响下,结构整体受到较大影响。应力主要集中在 BSM 板连接处其受到

的最大应力 720 MPa,已超出 316 L 不锈钢许用强度要求。提升法兰处也有一定的应力集中,其最大应力为 87.8 MPa。在结构上有一定的缺陷,不能满足结构体本身的要求,需对结构体进行优化。

3.2 结构优化

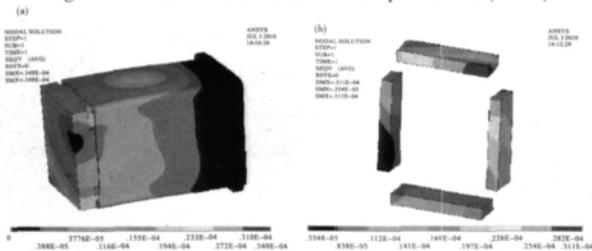
由分析结果可知,在 BSM 板与窗口插件主体连接部位应力集中超出了材料本身的刚度要求。通过改进设计,将原来设计的单排螺栓连接改为双排螺栓连接降低单个螺栓受力,同时增加每排螺栓个数。优化后窗口插件受到应力应变见图 7 和图 8。



(a) 整体应力;(b) BSM 连接处应力

图 7 优化后窗口插件应力

Fig.7 Stress distribution of EPP after optimization (in Pa)



(a) 整体变形;(b) BSM 连接处应变

图 8 优化后窗口插件应变

Fig.8 Displacement and strain of EPP after optimization (in meter)

通过改进设计后,窗口插件部件应力集中得到有效改善。窗口插件优化前后关键部件应力应变情况见表 2。

表 2 窗口插件关键部件优化前后应力和变形

Table 2 Stress and displacement of key parts of EPP before and after optimization

部件名称	优化前		优化后	
	最大应力 (MPa)	最大变形 (m)	最大应力 (MPa)	最大变形 (m)
提升法兰	0.878×10^8	1.6×10^{-3}	0.527×10^7	0.37×10^{-5}
窗口主体	0.118×10^9	2.3×10^{-3}	0.136×10^8	0.27×10^{-4}
BSM 连接处	0.720×10^9	2.5×10^{-3}	0.146×10^8	0.31×10^{-4}
窗口整体	0.720×10^9	2.5×10^{-3}	0.184×10^8	0.35×10^{-4}

从上表 2 我们可以看到优化后 BSM 板连接处最大应力由 720 MPa 降到 14.6 MPa,最大位移变形从 2.5×10^{-3} m 降低到 0.31×10^{-4} m,提升法兰处最大应力由 87.8 MPa 降到 5.27 MPa,最大位移变形从 1.6×10^{-3} m 降低到 0.37×10^{-5} m。窗口插件其他部位的应力应变都得到有效的降低,基本满足装置运行中对结构体的特殊要求。

4 总结

本文通过经典分析软件 ANSYS 对水平诊断窗口插件进行结构分析。分析了水平诊断窗口插件在最大电磁载荷和自重的作用下不能满足结构强度和变形要求,通过优化使得 BSM 板连接处的应力由最初的 720 MPa 降到 14.6 MPa,提升法兰处应力由 87.8 MPa 降到 5.27 MPa,同时窗口插件其他部位应力集中均得到较大改善。窗口插件最大变形从初始最大 2.5 mm 降到小于 1 mm,使得结构设计满足了材料的要求,较小的变形将保证窗口插件中光学仪器的对准性,同时为 ITER 后续地震、热等分析等提供理论依据。

参考文献

- [1] Douceu L, Walker C, Ingesson C et al. [J]. Fusion Eng. Des. 2007, 82:1216.
- [2] Walker C, Barnsley R, Costley A E et al. [J]. Fusion Eng. Des. 2005, 74:685.
- [3] Ciattaglia E, Ingesson L C, Campbell D et al. [J]. Fusion Eng. Des., 2007, 82:1231.
- [4] Yao D M, Song Y T, Gao D M et al. [J]. Fusion Eng. Des., 2001, 58~59:839.
- [5] Yao D M, Song Y T, Du S J et al. [J]. Fusion Eng. Des., 2005, 75~79:491.
- [6] Walker C. Diagnostic System Engineering (WBS5.0N) [Z]. Cadarache: ITER, 2005.
- [7] Walker C. Diagnostic System Engineering (DDD5.5N) [Z]. Cadarache: ITER, 2006.
- [8] 由美雁, 谢里阳. ANSYS 的网格划分在工程实例上的应用[J]. 计算机应用技术, 2007(9):37-39.
- [9] 钟顺时. 电磁场基础 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [10] 张玉民, 戚伯云. 电磁学. [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1997.
- [11] Load Specifications [R]. (LS) _222QGL_v3_3 ITER in 2009.