

# HT-7U 真空室支撑结构的数值模拟与实验研究<sup>\*</sup>

## NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH FOR THE VACUUM VESSEL SUPPORT SYSTEM OF HT-7U SUPERCONDUCTING TOKAMAK

宋云涛<sup>\*\*</sup> 姚达毛 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所 托卡马克装置设计室, 合肥 230031)

SONG Yuntao YAO Damao WU Songtao

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

**摘要** 结合 HT-7U 超导托卡马克装置真空室的实际运行工况, 首先提出一种低刚度柔性支撑结构, 这种结构不仅有足够的强度, 抵抗由于等离子体突然破裂产生的巨大电磁力, 而且还有一定的弹性, 吸收真空室在 250℃ 壁处理烘烤时所产生的热变形。然后运用有限元分析方法对该结构的力学性能进行数值模拟分析, 获得 HT-7U 真空室支撑结构的应力云图, 最大应力为 97 MPa, 小于结构基体材料 316L 不锈钢的许用应力。同时还专门设计一套真空室支撑结构力学实验测试平台, 利用光弹贴片法和电阻应变计测量法, 对该结构进行全面的力学性能测试, 不仅验证有限元分析结果的可信性, 而且还进一步证实 HT-7U 真空室支撑结构设计的合理性和安全性。

**关键词** 托卡马克 放电真空室 数值模拟 力学测试

中图分类号 TL631 O342 TH115

**Abstract** According to the plasma operation conditions for the HT-7U superconducting Tokamak, a kind of low rigid support system was designed, which was not only strong enough to withstand electromagnetic forces due to the plasma disruption but also sufficiently flexible to absorb some thermal expansion during 250℃ baking. A 3D finite element model was performed to analysis their structural strength, stiffness and fatigue life, laying the emphasis on the static stress analysis. The results showed that peak stress on the support system was 97 MPa, which is lower than the material's (316L stainless steel) allowable stress. At the same time a special mechanical testing apparatus was designed to test the mechanical capability for support structure using the methods of photoelasticity and resistance strain gauge measurement. The experimental data indicated that the results of finite element analysis were coincident with experimental test results. It also has been proved that the present design for the support system of HT-7U vacuum vessel is reasonable and feasible.

**Key words** Tokamak; Vacuum vessel; Numerical simulation; Mechanics measurement

Corresponding author: SONG Yuntao, E-mail: songyt@ipp.ac.cn, Fax: +86-551-5591310

The project supported by the National Meg-Science Engineering Project of Chinese Government, "HT-7U Superconducting Tokamak Nuclear Fusion Experiment Device".

Manuscript received 20020814 in revised form 20021009.

## 1 引言

HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置是 1998 年批准建设的国家“九五”重大科学工程。它的科学目标是 2003 年前后在中国科学院等离子体物理研究所建造一个具有非圆截面的大型超导托卡马克装置及其实验系统, 发展并建立在超导托卡马克装置上进行稳态运行所需要的多种技术, 开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变反应堆基础物理问题的实验研究, 不仅为我国聚变裂变混合堆的建立打下工程技术和物

理基础, 而且也未来世界和平利用核聚变能奠定坚实基础。

真空室是等离子体直接运行的场所, 它能够按照等离子体空间位形要求, 为等离子体提供一个高真空运行环境<sup>[1, 2]</sup>。其结构如图 1 所示, 底部支撑结构作为它的关键部件之一, 结构设计是否合理、可靠, 对于整个装置运行有着极为重要的意义。真空室支撑结构在设计时必须考虑两方面因素, 一方面要求它必须能够抵抗由于 250℃ 烘烤所产生的 10mm 的径向热变形; 另一方面要求它还能够满足装置在等离子体突然破裂

<sup>\*</sup> 20020814 收到初稿, 20021009 收到修改稿。国家“九五”重大科学工程项目子课题。

<sup>\*\*</sup> 宋云涛, 男, 1973 年 12 月生, 安徽安庆人, 汉族。中国科学院合肥研究院博士后, 现主要从事国家九五重大科学工程 HT-7U 超导托卡马克主机关键部件真空室及内部部件的数值分析、结构设计与研制, 共发表论文 20 余篇。

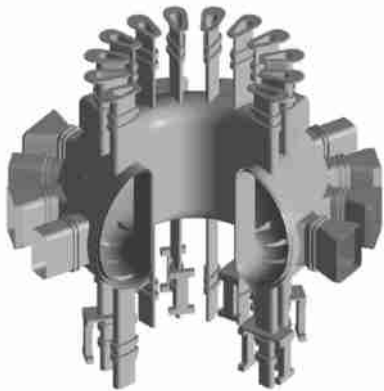


图 1 HT-7U 超导托卡马克装置真空室

Fig. 1 The vacuum vessel of HT-7U superconducting Tokamak

和垂直位移事件发生等危险工况下运行的强度、刚度和稳定性要求<sup>[3]</sup>。

为了验测目前支撑结构方案的安全性和可靠性, 以下首先采用有限元分析方法对真空室支撑结构进行数值仿真分析, 然后专门设计一套 HT-7U 真空室支撑结构实验平台, 模拟装置实际运行工况, 对真空室支撑结构进行一系列相关力学性能测试, 为真空室支撑结构的设计及研制提供可靠的工程数据。

2 真空室支撑结构的设计

由于整个真空室处于一个强磁场中, 磁场环境对结构材料要求也十分苛刻, 其结构材料也只能选用一些无磁且力学性能良好的不锈钢, 否则会影响装置正常的空间磁场分布, 不利于装置正常运行。在装置运行期间其不仅受到真空室自重对它产生的压力, 还会受到等离子体破裂以及 Halo 电流形成时真空室上产生的电磁力垂直通过窗口颈管对它施加的压力; 另外 HT-7U 装置真空室还是一种全刚性结构, 运行前的壁处理烘烤, 会使它沿着大环半径方向产生热膨胀, 若真空室烘烤至 250℃, 则其大环半径将增加 10 mm。这样就给真空室的支撑结构设计带来一定的难度。一方面要求它能抵抗由于 250℃烘烤产生的 10 mm 的径向热变形, 另一方面要求它能够满足在正常和危险工况下运行的强度、刚度和稳定性要求。如果采用刚性结构很难吸收真空室的径向热变形, 为此选用 316L 不锈钢, 提出并设计一种低刚度柔性支撑结构, 不仅能够承受真空室自重, 而且还能抵抗由于等离子体破裂、垂直不稳定和烘烤冷却等各种事件引起的水平、垂直载荷, 其结构如图 2 所示。它由 10 块 10 mm 厚的工字型钢板组成, 板与板之间的间隙为 3 mm, 在整个支撑结构的两端高为 150 mm 的地方, 3 mm 厚的间隙用 3 mm 厚的钢板填好, 然后通过 9 对螺栓将 10 块 10 mm 厚的钢板与 3 mm 厚的钢板填块固紧在一起, 并使之分别与下垂直窗口颈管上焊接的平板和基座连接起来。这样就

形成一个两头刚性强、中间刚性弱的柔性结构, 在真空室每个支撑窗口颈管的两边对称地布有两个这样的支撑, 整个真空室通过 8 个下垂直窗口上均匀布置的 16 个柔性支撑来支撑。这种结构轻巧灵便, 调整和装配比较方便。

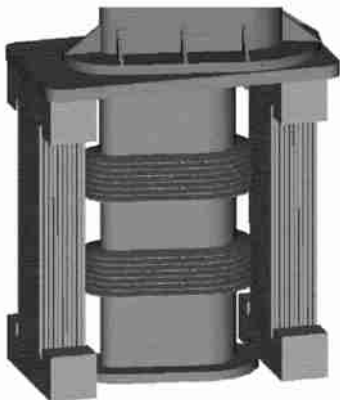


图 2 HT-7U 真空室支撑结构

Fig. 2 Support structure of the HT-7U vacuum vessel

3 真空室支撑结构数值分析

为了证实这种支撑结构的安全性和可靠性, 借助 COSMOS/NASTRAN 等大型结构商用有限元分析程序, 建立真空室支撑三维结构模型, 运用数值分析方法对该结构进行力学性能分析。网格模型采用的是 4 结点薄壳单元, 模型结点总数为 2 844, 单元总数为 1 580; 材料特性均取弹性模量 196 GPa, 泊松比 0. 3, 密度 7 961 kg/m<sup>3</sup>, 然后根据真空室实际运行边界条件, 对真空室支撑结构进行加载, 不仅沿水平方向上加 10 mm 位移, 而且在垂直方向考虑由于真空室自身质量 (40 000 kg) 以及 Halo 电流作用在真空室上产生的 3×10<sup>6</sup> N 的垂直向下电磁力, 通过支撑颈管传到底部支撑形成垂直下压力<sup>[4]</sup>, 即每个支撑承受的压力大小为 5. 26 MPa。支撑结构的最底端采用全固定约束。具体计算结果如图 3<sup>[5-9]</sup>。

通过有限元分析可以知道, HT-7U 真空室支撑在

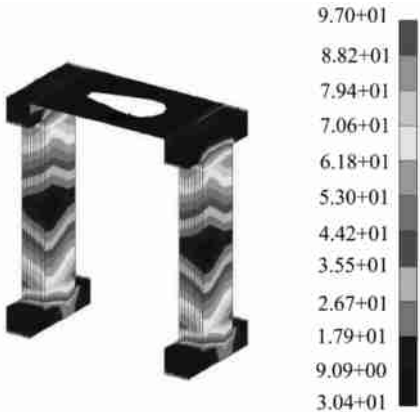


图 3 真空室支撑结构静态应力云图(MPa)

Fig. 3 Static stress analysis results for support system

极端危险工况下最大应力为 97 MPa(第三强度理论),在基体材料 316L 不锈钢许用应力(147 MPa)范围内,因此设计满足强度要求。另外在分析时若考虑真空室自重及 Halo 电流与周围磁场相互作用在真空室上形成的电磁力对底部支撑产生  $3 \times 10^6 \text{ N}$  的垂直载荷,垂直载荷引起的最大应力只有 17.2 MPa,而真空室径向 10 mm 热变形引起的弯曲载荷在支撑结构上产生的最大应力有 80.5 MPa。也就是说对于 HT-7U 真空室这种柔性支撑,弯曲载荷要比正压力载荷对结构的破坏性高 4 倍~5 倍。

另外作为支撑构件,疲劳破坏是其失效的主要原因之一,真空室在运行期间其应力幅是经常变化的,如由温度、电力、压力等引起的应力大小是各不相同的,有些循环应力低于材料的持久限,有些在持久限以上变化。计算不同应力循环的累积影响一般采用线性破坏准则,采用使用程度疲劳损伤系数来衡量,如果用度系数大于或等于 1,结构将发生破坏。根据 316L 不锈钢材料的  $S-N$  设计疲劳曲线和支撑结构水平方向上的脉动应力循环,借助 COSMOS 中 fatigue analysis 分析模块,对其进行疲劳分析。假定 HT-7U 装置的寿命为 20 年,每年运行 150 天,每十天硬烘烤一次,共有 300 次应力循环次数,通过有限元分析得出的结论也是令人满意的。支撑结构经过这么多次的疲劳累积用度损伤系数分别只有  $3 \times 10^{-5}$ ,远小于临界值 1,完全符合疲劳设计要求。

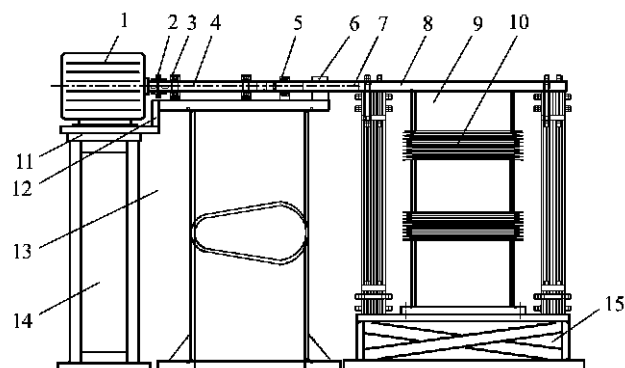
## 4 真空室支撑结构实验测试平台

真空室支撑实验平台主要由自动控制系统和机械系统两大部分组成。设计的立足点是基于遮这一套装置系统上,通过实验不仅能够获得支撑结构板的力学性能参数,而且还能了解相关窗口颈管、波纹管的力学性能。因此在设计时综合考虑各方面的测试要求,从力学的角度将推力丝杆与颈管设计成一个整体,在丝杆推动支撑板及波纹管组件的同时,支撑窗口颈管上也会有一个反向推力,这样通过推力丝杆的水平运动推动支撑结构板,使其产生水平位移,同时窗口颈管也会受到一个弯矩的作用,从而可以模拟真空室下垂直支撑窗口颈管的变形及其刚度情况,并分别对它们进行一系列的相关力学性能测试和实验应力计算。

### 4.1 机械系统

根据力学计算可知,真空室支撑结构的应力水平主要来自工字形板的弯曲应力,因此为了更好地模拟真空室支撑板及相关结构在装置运行时的情况,专门设计一套机械系统,在电机正反转下,实现一定量的弯曲变形。具体结构可参见图 4,是在电机回转轴上通过联轴器连接一根转轴,其两端分别固定在滑动轴承

上,然后转轴又通过一种凹口连接方式与另外一根转轴相连,将回转运动转化为水平方向上的直线运动,在电机的正反转下推动支撑结构的工字形板来回弯曲变形。



1. 电机 2. 联轴器 3. 滑动轴承 4. 回转轴 5. 6. 支架  
7. 推力丝杆 8. 支撑结构 9. 颈管 10. 波纹管 11. 底板  
12. 挡板 13. 颈管 14. 15. 角铁支架  
1. Electromotor 2. Coupling 3. Sliding bearing 4. Slew shaft  
5. 6. Bracket 7. Thrust screw 8. Support 9. Port neck 10. Bellows  
11. Bottom plate 12. Baffle 13. Port neck 14. 15. Angle iron bracket

图 4 HT-7U 真空室支撑实验平台结构

Fig. 4 Structure of the mechanical testing apparatus for HT-7U vacuum vessel supporting platform

### 4.2 电机自动控制系统

电机自动控制系统是控制三相交流电机自动按照设定的进给距离进行往复运动的自动控制设备,同时具有手动控制功能;面板上的计数器实时动态显示进给数据。通过调节外接调压器可以调整电机的制动电流;调节面板上的延时电位器可以调节进给换向的过渡时间。该系统还具有自动方式时的进给方向预显示功能,其控制原理图如图 5 所示。

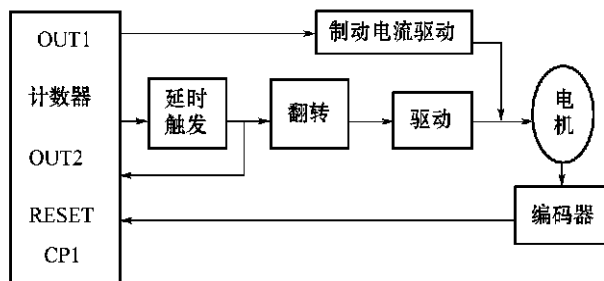


图 5 电机自动控制系统

Fig. 5 Autocontrol system for the electromotor

## 5 真空室支撑结构的应力测量

为了验证理论分析的可靠性,评估真空室有限元计算结果的准确度,在完成真空室理论分析的同时,采用光弹贴片法和电测应力应变测量法对真空室支撑结构进行应力测量,以获得相关的实验力学数据。

### 5.1 真空室支撑结构光弹贴片测量

根据理论分析结果,在支撑结构的根部危险区域

采用光弹贴片法进行测试,定性了解支撑结构板上的应力分布情况。将具有高灵敏度的光弹性材料制成的薄片用 PC-1 树脂和 PCH-1 固化剂按 10:1 的比例配制成粘结剂粘贴在真空室支撑板构件表面,构件受力后,贴片随构件一起变形,并产生反映构件表面应变的光学效应,在偏振光下出现干涉条纹,根据条纹级数即可算出构件表面的应力和应变。图 6 给出真空室支撑结构光弹贴片法测量获得的光栅条纹图案。

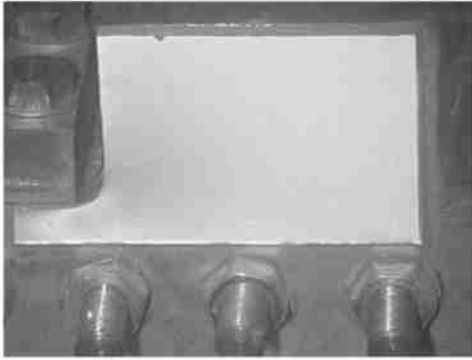


图 6 真空室支撑结构应力集中部位处的光栅条纹图案

Fig. 6 Grating stria on the area of stress concentration for the vacuum vessel supporting structure

在实验过程中,光弹性贴片牢固地粘贴在构件表面,所以假定构件表面应变完全传递给贴片,即它们之间对应点的应变相等<sup>[7]</sup>。

$$\epsilon_1^c = \epsilon_1^s \quad \epsilon_2^c = \epsilon_2^s \quad (1)$$

其中上标 c 表示贴片, s 表示构件,此外构件自由表面处于平面应力状态,贴片较薄,垂直于表面方向的应力均为零,即

$$\sigma_3^c = \sigma_3^s = 0 \quad (2)$$

由应力应变关系,在贴片中有

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_c = \frac{E_c}{1 + \mu_c} (\epsilon_1 - \epsilon_2)_c \quad (3)$$

又根据平面应力光学定律,考虑到在反射式偏光系统中,光线通过贴片两次,故在贴片内有<sup>[7]</sup>

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_c = \frac{Nf_\sigma}{2h_c} \quad (4)$$

$$f_\epsilon = \frac{1 + \mu_c}{E_c} f_\sigma \quad (5)$$

$f_\sigma$ 、 $f_\epsilon$  为贴片材料应力和应变条纹值,  $N$  为等差条纹级数,  $h_c$  为贴片厚度,  $E$  为材料弹性模量,  $\mu$  为泊松比。将式(4)、(5)代入式(1)、(2)、(3),可以得到贴片处支撑构件上每点的主应变差和主应力差分别为<sup>[7]</sup>

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)_s = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{Nf_\sigma}{2h_c} = \frac{Nf_\epsilon}{2h_c} = Nf \quad (6)$$

其中  $f$  为光弹贴片条纹值。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_s = \frac{E_s}{1 + \mu_s} (\epsilon_1 - \epsilon_2)_s \quad (7)$$

从测量获得的光栅图案可以看出,最大应力出现在支撑结构根部,并对照暗视场白光光弹性仪产生的彩色序列与条纹级数对应表<sup>[7]</sup>,可知支撑结构板根部条纹级数为 0.6 ~ 0.65 左右,将相关光弹贴片的材料参数 ( $f = 925 \mu$ ) 代入公式(6)和(7),可以求得支撑板根部区域最大主应力差为 85.4 MPa ~ 92.5 MPa。

## 5.2 真空室支撑结构电阻应变计测量<sup>[8,9]</sup>

根据光弹贴片的实验结果,确定真空室支撑结构的根部为危险区域,利用电阻应变计法进行测量。但实际上结构各处的应力状态大多是不一样的,如在离支撑结构板边界稍远的中部,其主应力方向是已知的;而有些部位如孔边和倒角处以及波纹管上各点应力状态的主应力方向却是未知的。对于这些不同的应力状态,必须采用不同的贴片方案。因此分别选取阻值为 120  $\Omega$ 、灵敏度为 2.07 的单片和 45° 应变花,用 502 胶和环氧树脂进行贴片并固化。布片图如图 7 所示。实验采用日本电气三荣株式会社生产的 7V13 型数据应变仪。

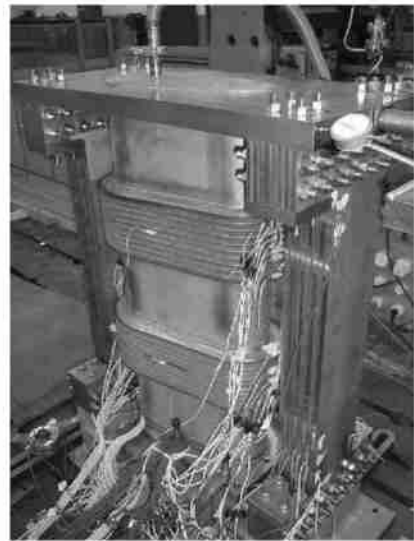


图 7 真空室支撑结构应变计布置

Fig. 7 Dispose of strain gauge on the vacuum vessel supporting system

通过实验测试,HT-7U 真空室支撑结构在极端危险工况下最大应力出现在支撑结构板下底部倒角处,其值为 86.8 MPa,与有限元分析结果(97 MPa)相对误差为 10.5%。

由于真空室在运行前或运行中需要进行 250 °C 壁处理烘烤,此时产生的热变形会使底部支撑沿径向方向发生 10 mm 的水平位移。根据物理要求,HT-7U 在整个装置运行期间一共要进行 300 次左右的热烘烤。为了获得真空室支撑结构的实验疲劳数据,取安全系数为 6,模拟真空室支撑结构的热变形(沿水平方向加 10 mm 位移)进行了 1800 次的疲劳测试。结果发现真空室支撑和窗口波纹管经历这么多次的循环之后,对应各点的应力变化很小。1800 次循环疲劳测试前最

大应力为 86.8 MPa, 经过 1 800 次疲劳后最大应力为 88.9 MPa。

根据有限元分析结果, 真空室支撑结构的最大应力主要是由于支撑板弯曲产生的, 垂直载荷影响较小。为了验证这一规律, 实验时在垂直方向上添加 10 000 N 的重块, 垂直载荷引起的平均应变为  $3.7 \mu\epsilon$ 。然后根据材料线弹性规律, 通过线性计算可以得知真空室支撑结构在真空室自重及 Halo 电流引起的电磁力的作用下, 产生的平均应变为  $78.7 \mu\epsilon$ , 即应力为 15.7 MPa, 基本与有限元计算结果 (17.2 MPa) 一致, 相对误差为 9.6%。

## 6 结论

以上首先综合考虑真空室在各种工况下的实际运行特点, 提出一种低刚度柔性结构作为 HT-7U 装置真空室的支撑, 不仅能够抵抗真空室 250 °C 热烘烤引起的径向热变形, 而且能够满足装置运行时的强度和刚度要求。通过对 HT-7U 装置真空室支撑结构的有限元分析, 获得真空室支撑结构的应力云图。然后模拟真空室支撑结构的运行特点, 专门设计一套真空室支撑结构实验平台, 对低刚度柔性支撑和窗口波纹管的力学性能进行全面测试, 一方面得到许多重要的工程实验数据, 为进一步完成真空室结构设计打下坚实的基础; 另一方面也从实验力学的角度充分验证有限元分析计算结果的准确性和可靠性。通过对数值分析和实验研究可以获得如下主要结论:

1) 真空室支撑结构是安全可靠的, 数值模拟分析获得的应力值与光弹贴片法测量和电阻应变计法测量获得的实验结果基本一致, 误差在 10% 左右。

2) 真空室支撑结构上的应力主要来自弯曲应力, 垂直载荷对它影响不明显。不管从有限元分析结果看, 还是从实验测试结果看, 垂直载荷相对于弯曲载荷

对真空室支撑板上的应力值影响较小。实验测量结果与有限元分析结果基本一致, 相对误差为 9.6%。

3) 真空室支撑结构经过 1 800 次疲劳加载, 各测量点的应力变化值不大, 未出现疲劳现象。目前真空室支撑结构的设计完全能够满足装置在服役期内的疲劳设计要求。

## References

- 1 Inoue N, Komori A, Yonezu H, et al. Design and construction of the LHD plasma vacuum vessel. *Fusion Engineering and Design*, 1998, 41: 331 ~ 336.
- 2 Ioki K, Johnson G, Shimizu K, et al. Design of the ITER vacuum vessel. *Fusion Engineering and Design*, 1995, 27(1): 39 ~ 51.
- 3 SONG Yuntao, YAO Damao, WU Songtao, et al. Design of the HT-7U superconducting Tokamak vacuum vessel. *Machine Design and Research*, 2000 1: 59 ~ 60 (In Chinese) (宋云涛, 姚达毛, 武松涛, 等. HT-7U 真空室的结构设计. *机械设计与研究*, 2000, 1: 59 ~ 60).
- 4 SONG Yuntao. Structure analysis and experimental research for the vacuum vessel of HT-70 superconducting Tokamak nuclear fusion device [Ph D Thesis]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2001 (In Chinese) (宋云涛. HT-7U 超导托卡马克核聚变装置真空室结构仿真分析与试验研究 [博士学位论文]. 北京: 中国科学院, 2001).
- 5 Song Yuntao, Yao Damao, Wu Songtao, et al. Temperature field and thermal stress analysis of HT-7U vacuum vessel. *Plasma Physics and Technology*, 2000 2(5): 443 ~ 448.
- 6 WANG Xucheng, SHAO Ming. Basic theory and numerical methods for finite element methods. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 (In Chinese) (王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1988).
- 7 Teaching and Research Group for Mechanics of Materials in Tianjing University. Theory of photoelasticity and technology of testing. Tianjing: Tianjing University Press, 1980 (In Chinese) (天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术. 天津: 天津大学出版社, 1980).
- 8 LIU Hongwen. Mechanics of materials. Beijing: Higher Education Press, 1990 (In Chinese) (刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1990).
- 9 Tado S, Kitamura K, Itou Y. Dynamic analysis of the Tokamak support system in ITER. *Fusion Engineering and Design*, 1998, 41: 421 ~ 429.