

KTX 反场箍缩装置主支撑结构设计与分析

张建成^{1,2}, 宋云涛², 杨庆喜², 赵文龙², 郑金星², 丁卫星³, 刘万东³

(1. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 安徽 合肥 230029;

2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230029)

摘要: KTX 反场箍缩实验装置主支撑由柔性支撑和支撑平台组成, 主要用来支撑真空室、导体壳和纵场线圈的重量。鉴于主支撑结构的重要性, 通过有限元分析和理论分析相结合的方法对主支撑进行了强度分析和稳定性分析, 给出了主支撑应力分布和变形情况及不同结构参数下的临界载荷。分析结果验证了主支撑结构的可行性, 并为主支撑的后续优化设计提供理论依据。

关键词: KTX; 柔性支撑; 屈曲; 有限元分析

中图分类号: TL626; TL6321.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)10-1862-05

doi: 10.7538/yzk.2013.47.10.1862

Design and Analysis on KTX Reversed Field Pinch Device Main Support Structure

ZHANG Jian-cheng^{1,2}, SONG Yun-tao², YANG Qing-xi², ZHAO Wen-long²,
ZHENG Jin-xing², DING Wei-xing³, LIU Wan-dong³

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: KTX reversed field pinch experimental device main support is composed by the flexible support and support platform, and mainly used to support the weight of vacuum chamber, the conductor casing and the toroidal field coil. In view of the main supporting structure's importance, the main support stress distribution and deformation and critical load under different structural parameters were obtained through finite element analysis and theoretical analysis on the main support for the strength analysis and stability analysis. The results demonstrate the feasibility of the main supporting structure and provide a theoretical basis for subsequent optimization-based support.

Key words: KTX; flexible support; buckling; finite element analysis

受控热核聚变是当代自然科学研究中的一个意义十分重大的前沿领域, 其研究的最终目标是通过受控核聚变为人类开发一种取之不

尽、用之不竭的新能源——聚变能源。目前, 世界上主要的三类磁约束核聚变研究装置是仿星器、托卡马克和反场箍缩。反场箍缩装置

(reversed field pinch, RFP)是一个环形磁约束等离子体装置,有别于托卡马克、仿星器,具有工程简单、比压高以及欧姆加热可直接达点火条件等显著优点,是探索先进磁约束聚变变形的重要装置之一。为了更好地研究磁约束聚变变形,我国将建造一个反场箍缩实验装置——KTX,其设计目标为:半径比 3.625 ($R/r = 1.45 \text{ m}/0.4 \text{ m}$),最大等离子体电流 1 MA,在无反馈时放电时间 10~30 ms,主动反馈控制时间 100 ms。世界上建成的反场箍缩装置有意大利的 RFX^[1-2]、美国的 MST^[3-4]、日本的 TPE-RX^[5]、瑞典的 EXTRAP T2R^[6]。通过深入研究反场箍缩装置结构部件的力学性能,对研究相关磁约束核聚变装置结构部件有重要的借鉴作用。KTX 主支撑结构是反场箍缩装置工程设计的重要部分,为真空室、导体壳和纵向场线圈提供支撑定位作用,在主支撑设计过程中,通过有限元方法对中心主支撑进行相关分析,分析结果为支撑后续优化设计提供理论参考数据。

1 KTX 真空室系统支撑的结构设计与分析

1.1 KTX 装置主支撑结构设计

KTX 主机装置 3D 模型剖视图如图 1 所示。其中主支撑结构主要用于支撑纵场线圈、真空室和导体壳,以及保证在安装和运行过程中在电磁力作用下支撑定位作用。纵场线圈和真空室的安装精度对实验运行时控制等离子体至关重要。另外,主支撑结构的强度和稳定性对整个装置的安全运行至关重要。因此,在设计过程中,拟通过有限元分析的方法对 KTX

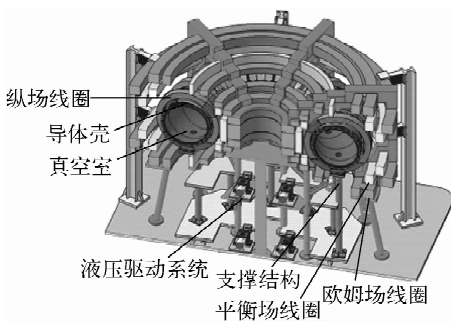


图 1 KTX 反场箍缩装置 3D 图

Fig. 1 3D model of KTX reversed field pinch experimental facility

装置主支撑强度、刚度和稳定性进行分析研究。

KTX 装置的主机主支撑主要由支撑平台和柔性支撑组成,其结构如图 2 所示。对于柔性支撑,一方面用来支撑真空室、导体壳和鞍型线圈重量,另一方面克服纵场线圈通电时产生的电磁力作用的倾覆力矩。

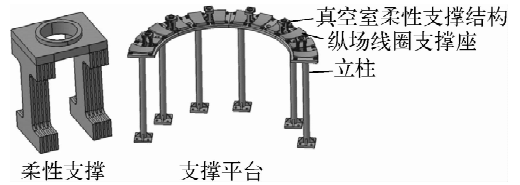


图 2 支撑结构

Fig. 2 Support structure

柔性支撑主要通过采用多块工字钢薄板叠加而成,为减少薄板上涡流形成路径,在各工字钢薄板之间夹着绝缘板,每块板的厚度为 10 mm。由于真空室底部设有真空抽气窗口,抽气窗口将焊接在真空室上。真空室支撑刚度设计要求为避免真空抽气窗口在抽气机组和电磁力交替作用下对焊缝的损坏,同时保证真空室装配精度和减少应力集中。因此,通过多块工字钢薄板叠加形成的支撑可有效满足此要求。此支撑具有抗弯刚度,又具有一定柔性的特点。根据真空室的抽气管道数目,真空室柔性支撑总共有 12 个,沿着真空室大圆均匀分布。另外,支撑平台主要支撑着所有纵向场线圈、真空室、导体壳鞍型线圈重量,它主要由底部 12 根支撑立柱和大圆支撑台组成,支撑平台在设计中在对称位置分为两部分,每部分有 6 根支撑立柱支撑重量,此设计主要满足真空室双 C 结构在拆卸维修时能沿着真空室开口方向分开 30 cm 的距离。整个支撑平台的高度约 2 090 mm,支撑平台底部留有足够的空间将来用于真空抽气系统、底部诊断装置和相关测量线等的装配。

1.2 KTX 装置主支撑结构分析计算

1) 支撑结构材料选用

在设计过程中,考虑核聚变装置部件运行的工作环境和工况,选择材料是设计的重要组成部分。针对 KTX 装置主支撑部件,材料要求具有无磁、强度高、刚度好和良好的焊接性能

及加工性能的特点。基于这种要求,其支撑部件的材料选择为 316L 无磁不锈钢。316L 在室温下具有良好的塑性和韧性,且由于有元素 Mo 的加入使奥氏体组织更加稳定,焊接时基本不产生非奥氏体组织^[7]。316L 无磁不锈钢的物理力学参数列于表 1。

表 1 316L 物理力学参数

Table 1 316L physical and mechanical parameters

密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	屈服极限 σ_s / MPa	强度极限 σ_b / MPa	泊松比 μ	杨氏模量 E / GPa
7 980	175	480	0.294	197

2) 支撑结构静力分析

支撑结构静力分析强度准则采用 Huber-von Mises 强度理论,也称为第四强度理论:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (1)$$

其中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为第 1、第 2、第 3 主应力; $[\sigma]$ 为许用应力; σ_s 为屈服极限(数值参考表 1);

n_s 为安全因数,设计中取 5。

基于广义胡克定律^[9]和有限元分析方法对柔性支撑和支撑平台进行分析计算,其结果如图 3 和 4 所示。根据分析结果,叠板柔性支撑最大应力 $\sigma_{\text{board}} = 2.79 \text{ MPa} < [\sigma]$,其安全系数 $n = \frac{\sigma_s}{\sigma_{\text{board}}} = 63 > n_s$,发生在支撑上端的圆凸台处,相当于发生在两端固定简支梁中间;最大位移 $D_{\text{board}} = 0.001 8 \text{ mm}$,发生在支撑结构的上端中间和叠板的最内侧位置。支撑平台最大应力 $\sigma_{\text{platform}} = 23.5 \text{ MPa} < [\sigma]$,其安全系数 $n = \sigma_s / \sigma_{\text{platform}} = 7.4 > n_s$,发生在两两立柱之间的平台上;最大变形 $D_{\text{platform}} = 0.25 \text{ mm}$,位于右侧两个支撑柱距离最大中间外边缘处,结果表明纵场线圈的重心位置位于支撑平台台面中心略偏外处。根据 KTX 装置工程设计要求,结构在极端工况下,支撑结构最大变形量不超过 0.5 mm,综上计算分析结果,叠板柔性支撑和支撑平台满足设计要求。

3) 支撑结构稳定性分析

真空室系统支撑结构采用的是叠板式柔性支撑结构,支撑平台结构采用的是立柱结构,其

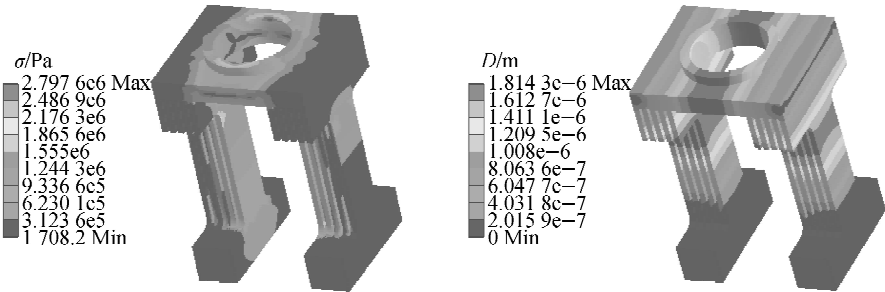


图 3 叠板柔性支撑应力和变形分布

Fig. 3 Static stress and deformation distribution for pack flexible support

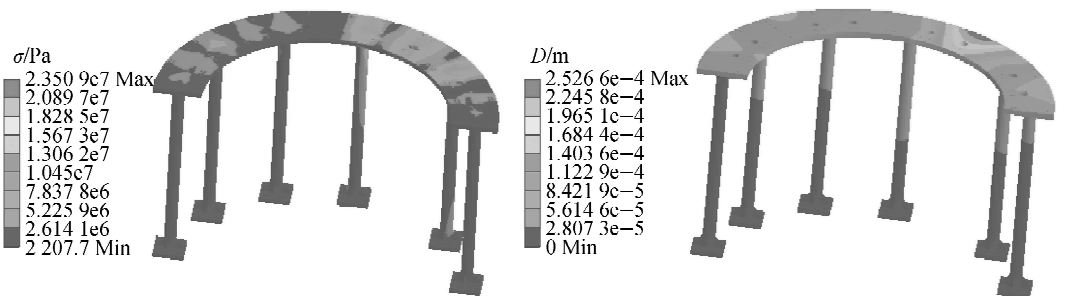


图 4 支撑平台结构应力和变形分布

Fig. 4 Static stress and deformation distribution for support terrace structure

所承受的载荷以压载荷为主。叠板(较薄, 10 mm)和支撑平台立柱(较高, 2 m)可认为是细长杆, 细长压杆丧失工作能力, 往往不是因为强度不够, 而是因为杆件丧失直线形式造成的破坏, 欲保证支撑结构的正常工作, 除了要满足强度条件外, 还要满足稳定性要求。首先验证支撑结构的计算是否满足欧拉公式, 根据材料力学知识:

$$\lambda = \frac{\mu l}{i}, i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{d}{4} \text{ (实心圆柱体)},$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_P}} \quad (2)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \text{ (欧拉公式)} \quad (3)$$

$$n = \frac{F_{cr}}{F} \geq n_w \text{ (稳定性条件)} \quad (4)$$

其中: λ 为长细比; λ_1 为长细比极限值; μ 为长度因数, 支撑结构一端固定一端自由取 2^[8]; l 为压杆长度; i 为截面的惯性半径; I 为截面的惯性矩; A 为截面积; E 为杨氏模量; σ_P 为比例极限(屈服极限); F_{cr} 为临界载荷; F 为实际载荷; n 为工作稳定安全系数; n_w 为许用稳定安全系数。通过式(2)代入数据, 计算得 $\lambda_{\text{叠板}} = 73.33 < \lambda_1 = 105.35$, $\lambda_{\text{立柱}} = 112.67 > \lambda_1 = 105.35$, 即叠板支撑屈曲计算不适用欧拉公式, 立柱的屈曲计算适用欧拉公式。由式(3)求出单根立柱的临界力为 1 235 kN, 立柱所承载是实际载荷 20.58 kN, 通过式(4)即 $n = 60 > n_w$ (1.8~3)^[8-9] 可知, 单根立柱完全满足设计要求。而对于多叠板和多立柱组成的支撑系统组合结构, 由于每组结构的约束条件空间位置不同, 能承受的临界力大小也不同, 计算较为复杂。

运用有限元分析软件进行计算, 叠板柔性支撑底部为固定约束, 顶端为自由状态, 考虑到整个真空室结构装配后形成一个很大的刚性体, 当与支撑结构连接后, 支撑的顶端实际上是固定约束; 支撑平台底部为固定约束, 顶端施加均布载荷。支撑结构不同模型的一阶临界载荷系数(实际稳定安全系数 n) 计算结果列于表 2。

表 2 支撑结构的临界载荷系数

Table 2 Critical load coefficient of support structure

有限元模型	临界载荷系数	
	单组支撑	整体支撑
叠板柔性支撑	82.6	667.8
支撑平台立柱	58.8	172.4

表 2 结果表明, 叠板柔性支撑结构的临界载荷系数相对其应力远超过了 316L 强度的许用值, 属于小柔度杆, 只需考虑强度即可; 从支撑平台的临界载荷系数可看出, 支撑平台还是属于大柔度结构。对于支撑平台立柱, 理论和软件计算单组支撑结果相差 2%, 整体支撑结构的系数要明显大于单组支撑结构。

相对于单个与整体临界载荷系数情况, 有必要了解叠板柔性支撑厚度以及实心立柱半径对支撑真空室系统稳定性的影响情况, 借助有限元分析模型计算了叠板柔性支撑和支撑平台立柱在均匀载荷作用下^[6], 其临界载荷系数与不同结构尺寸分别变化的情况, 结果如图 5 所示。

从图 5 可看出, 临界载荷系数与叠板厚度和支撑平台立柱的半径呈正比关系, 因此, 加大

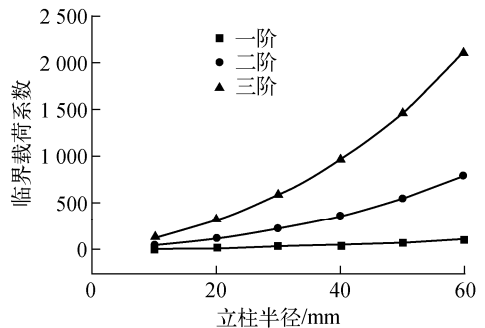
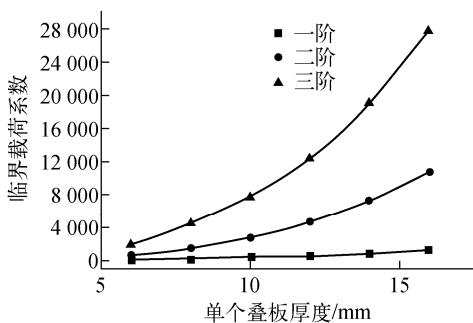


图 5 临界载荷系数关系曲线

Fig. 5 Relation curve of critical load coefficient

结构的厚度和半径可提高支撑结构的临界载荷系数。根据 KTX 工程设计要求,在已满足空间设计和大安全裕度情况下,可选叠板 10 mm 和立柱半径 60 mm 作为工程设计结果。此外,通过优化叠板厚度和实心立柱半径结构,可进一步加强支撑结构的稳定性和节约成本。

2 结论

根据上述设计与计算分析,可得出以下结论。

1) 叠板柔性支撑结构能很好地解决真空室受载作用,立柱能克服大柔度杆稳定性问题,方案可行。叠板柔性支撑结构和支撑平台在给定的结构尺寸下均能满足静力载作用,柔性叠板最大应力 $\sigma_{\text{board}} = 2.79 \text{ MPa}$,最大变形 $D_{\text{board}} = 0.0018 \text{ mm}$,支撑平台最大应力 $\sigma_{\text{platform}} = 23.5 \text{ MPa}$,最大变形 $D_{\text{platform}} = 0.25 \text{ mm}$,其分别小于材料的许用应力 $[\sigma]$,安全系数均大于设计要求的安全系数,最大变形均小于允许变形(0.5 mm)。

2) 叠板柔性支撑结构属于小柔度杆,只需考虑强度问题,支撑平台立柱属于大柔度杆,通过计算,整体支撑临界载荷系数达 172.4,是安全系数的 20 多倍,单个立柱也达到安全系数的 5 倍多,即此尺寸的结构是符合要求的,并存在一定的安全裕度。不同结构尺寸的临界载荷系数的变化关系为成正比关系。但这些结构尺寸并非最优尺寸,叠板的厚度和形状、平台的厚度和立柱的直径均需优化,还有主支撑结构的地震分析等,都是下一步装置结构部件设计分析需详细做的工作。

3) 主支撑设计是 KTX 装置工程设计的主要工作之一,叠板柔性支撑和立柱支撑的设计

分析为下一步的研发和相关测试提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] BODIN H A B, NEETON A A. Reversed-field-pinch research[J]. Nuclear Fusion, 1980, 20: 1 255-1 324.
- [2] ROSTAGNI G. RFX: An expected setup in RFP research[J]. Fusion Engineering and Design, 1995, 25: 301-313.
- [3] FELLIN L, KUSSTATSCHER P, ROSTAGNI G. Overall plant design, layout and commissioning[J]. Fusion Engineering and Design, 1995, 25: 315-333.
- [4] DEXTER R N, KERST D W, LOVELL T W. The Madison symmetric torus[J]. Fusion Technology, 1991, 19: 131-139.
- [5] HIRANO Y, YAGI Y, SHIMADA T. Outline of a large reversed field pinch machine, TPE-RX [J]. Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, 1999(5): 137-154.
- [6] ERIK K, OLOFSSON J, BRUNSELL P R, et al. Predictor-based multivariable closed-loop system identification of the EXTRAP T2R reversed field pinch external plasma response[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2011, 53(8): 1-11.
- [7] 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.
- [8] 刘鸿文. 材料力学 I:上册[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [9] 机械设计手册(1)[M]. 北京:机械工业出版社,2006.