

HT-7U 超导托卡马克冷质 部件支撑结构方案

陈先忠, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:介绍了用于 HT-7U 超导托卡马克装置冷质部件支撑的柔性支撑结构, 设计了支撑整个纵场系统及极各场系统的结构方案, 对支撑结构进行了传热分析、应力分析和稳定性分析。

关键词: 超导托卡马克; 柔性支撑; 有限元分析

中图分类号: TL631.2⁺4; TH122

文献标识码: A

1 引言

受控热核聚变是当代自然科学研究中的一项具有十分重大意义的前沿领域, 它的最终目标是为人提供取之不尽、用之不竭的新能源——聚变能源。HT-7U 超导托卡马克^[1]正是基于此意义, 它的科学目标是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堆基础物理问题的实验研究。HT-7U 主机装置主要由超导极向场磁体、超导纵场磁体、真空室、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑结构等几大部件组成^[2,3], 如图 1 所示。其中冷质部件支撑结构是用于支撑整个纵场系统及极向场系统的重量以及部分电磁力与热收缩力, 保证纵场系统的精确安置位置, 保证纵场系统与基础间良好的电、热绝缘。

2 HT-7U 超导托卡马克纵场支撑的设计及结构简述

作为支撑结构主要是为了支撑静载荷或动载荷^[4]。结构的破坏主要是由于应力的大小超过了材

料的许用应力而导致结构的失效, 一般通过降低应力或选用强度高的材料可以满足条件, 而对于大型重质低温系统 HT-7U 超导托卡马克装置的支撑结构来说, 它是纵场系统中的一个重要部件, 它主要用于支撑整个纵场系统和极向场系统的重量以及部分电磁力与热收缩力, 保证纵场系统的精确安置位置, 保证纵场系统与基础间良好的电、热绝缘。它除了在静载荷条件下要有足够的强度、刚度、稳定性及抗震性外, 还要解决运行时热负荷、电磁力及热胀冷缩引起的热应力所带来影响等问题。

一种叠板式柔性支撑结构采用多块薄板通过螺栓连接而成, 如图 2 所示。叠板间有一定的间隙, 对于单块薄板来说, 其垂直于薄板方向的抗弯刚度 (EI_z) 远大于平行于薄板方向的抗弯刚度, 将这种支撑结构用于支撑纵场系统正是利用其一个方向抗弯刚度小的方面。支撑结构的安装如图 3 所示, 它是由 16 个单个支撑均匀分布在一个圆上, 在支撑上是纵场磁体系统, 支撑底部座落在外真空杜瓦上。运行过程中, 支撑结构的底部处于室温条件, 纵场磁体由室温降到液氮温度, 就会产生向中心收缩的趋势。

收稿日期: 2002-03-20; 修订日期: 2002-10-15

作者简介: 陈先忠(1971-), 男, 博士研究生, 从事结构设计及力学计算。

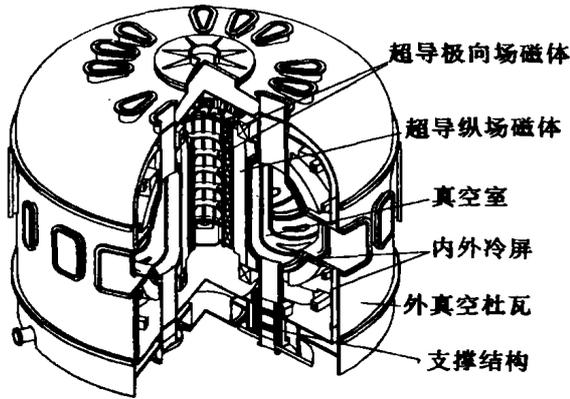


图1 HT-7U 超导托卡马克装置

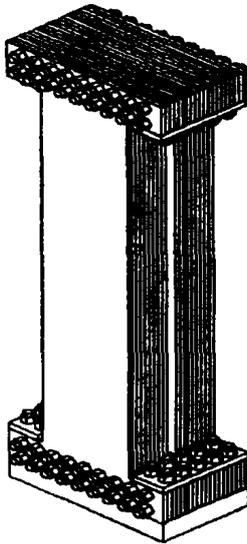


图2 单个支撑结构

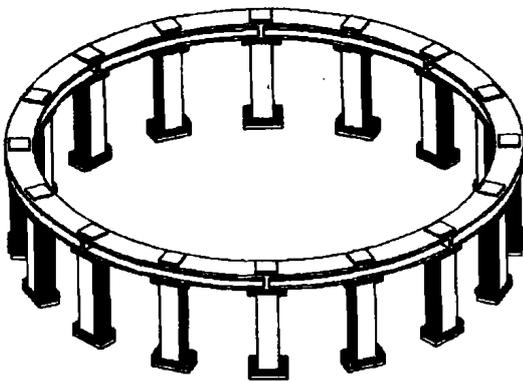


图3 整个支撑系统

3 结构分析

支撑结构的主要参数有板厚、板高、板宽、薄板数量、薄板间的间隙以及在平面圆环上均匀分布的支撑数量,对结构的设计首先必须从强度、刚度和稳定性上进行考虑,在纵场系统的静重作用下的压应力大小,可以通过调节薄板的数量和板宽来满足强度条件,从强度上考虑应该是板的数量越多板越宽越好。采用板式支撑结构的特点在于,这种结构增加了结构的柔性,而 HT-7U 装置在稳态运行时的特点是纵场系统处于液氮的低温状态,支撑系统是连接纵场系统和基座的桥梁,这就导致支撑系统在工作过程中一端处于低温,而另一端处于室温,使整个支撑由下向上存在着一个温度梯度的分布状态。另外,整个装置从开始到稳定工作的过程中,纵场系统是从室温到低温的不断变化,对于圆形装置来说,就会有向中间收缩的位移,而超导磁体在电磁力的作用下也要引起一定的位移,对于刚性大的结构而言,很小的位移都能产生很大的应力,极易造成结构的破坏,而柔性支撑的特点就是能够很好地解决这一问题。对于受弯曲的板结构,弯曲应力的大小主要与顶端水平力的大小和板厚有关,纵场在冷却过程中引起的薄板端部挠度大小是一定的,因此板越薄弯曲应力越小。从另外一个角度考虑,板的数量越多越厚,结构的刚性越大,要使顶端产生相同的挠度,就必然会使增加支撑结构和纵场接触处力的大小,即增加接触处热应力的大小。在工程结构中,凡是有产生压应力分量的结构,就存在着失稳的可能性。对于该薄长板结构来说,稳定性显得更重要,该支撑结构是由多块工字型薄板串联而成,工字型板的直段尺寸(10mm × 200mm × 960mm),当在长度方向存在中心压力,该压力超过某一值时,就会使薄板发生翘曲变形。由材料力学可得,当一端为固定约束,另一端处于自由状态下,板的临界力大小为 892kg,而这时薄长板的压应力只有 4.46MPa,远远小于材料的极限应力,从稳定性方面考虑,随着薄板数量的增加,支撑结构的临界力增加。考虑到整个纵场结构装配后形成一个很大的刚性体,当与支撑结构连接后,支撑结构顶端的受到一定的约束,由欧拉公式 $F_{ij} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}$ 得,临界力 F_{ij} 的大小与薄板长度

系数 μ 成反比,而薄板长度系数与薄板两端的约束条件有关,两端固定状态时为 0.65,一端固定,另一端自由时为 2.1。又由于薄板板面不在同一平面,也会使整个支撑结构的稳定性大大改善。从热负荷方面考虑,由公式 $Q = \lambda \frac{\Delta T}{l} A$ 得,热负荷的大小与材料的导热系数 λ 、结构两端的温差 ΔT 、板长 l 及薄板的横截面积 A 有关。对于材料、结构长度尺寸和外载荷一定的情况下,导热系数 λ 、温差 ΔT 、板长 l 也就不变,所以减小热负荷只能从薄板的横截面积考虑,减小薄板的横截面积就意味着减小板厚或板的数量,这又会降低结构的稳定性和强度。

以下是通过有限元分析软件计算的结果:取支撑结构的 1/16 为研究对象,有限元网格模型如图 4 所示,工字钢结构采用四面体单元,工字型薄板的中部采用壳单元,两端采用规则的六面体单元。

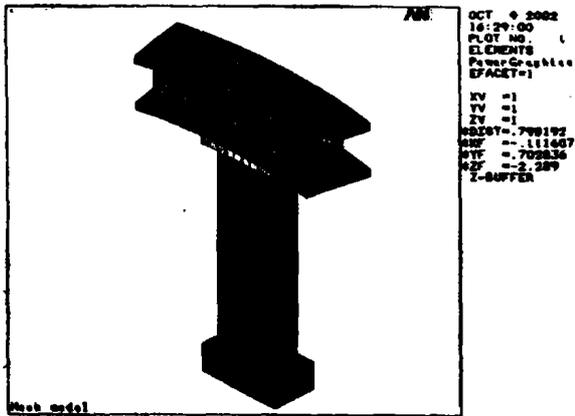


图 4 有限元网格

3.1 传热分析

边界条件:底端温度为 300K,顶端温度为 4.5K,支撑与环型工字钢的接触处温度为 80K,计算结果如下,图 5 为温度分布,在薄板等高线上温度是一致的,而在工字钢上温度有变化,这是因为在工字钢上只有中间是与纵场接触的,温度边界只有中间 20×20 的范围为 4.5K,这种现象反映在热流分布图上较明显,图 6 为热流分布。

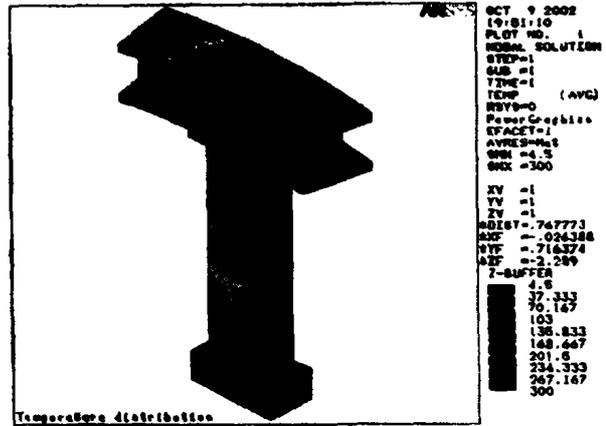


图 5 温度分布图

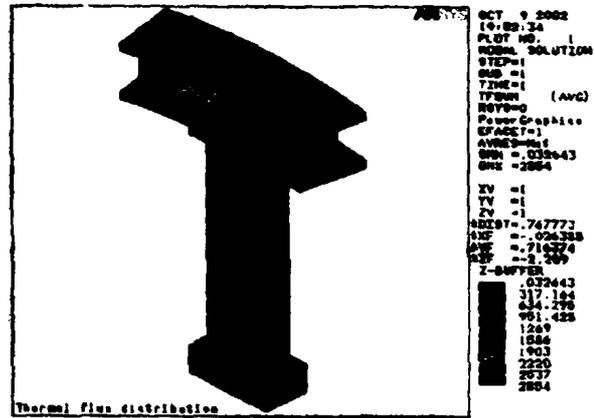


图 6 热流分布图

3.2 应力分析

边界条件:底端采用全约束的形式,顶端中部施加 12.5t 的面力作用,工字钢两端施加对称约束,由于材料的机械性能与温度有关,所以将上面温度分布作为温度载荷,计算的结果如下图,图 7 为应力分布图,最大应力为 72.5MPa,最大应力的位置在薄板的低温区。

图 8 为位移分布图,顶端向中心收缩位移是 6.768mm。

3.3 稳定性分析

图 9 为支撑结构的一阶失稳形式,失稳发生在内侧的薄板上,由计算得到,支撑结构的安全系数达到 4.3,足以满足要求,该结构的设计是可靠的。

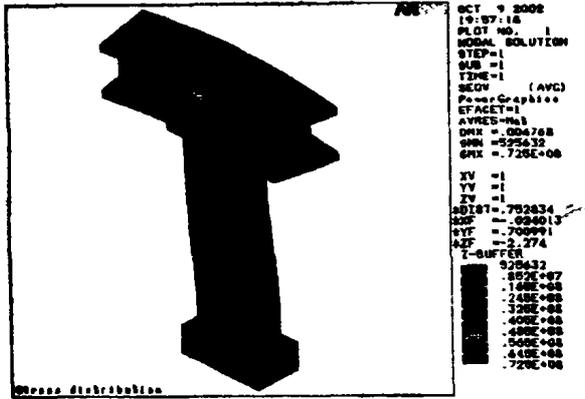


图 7 应力分布图

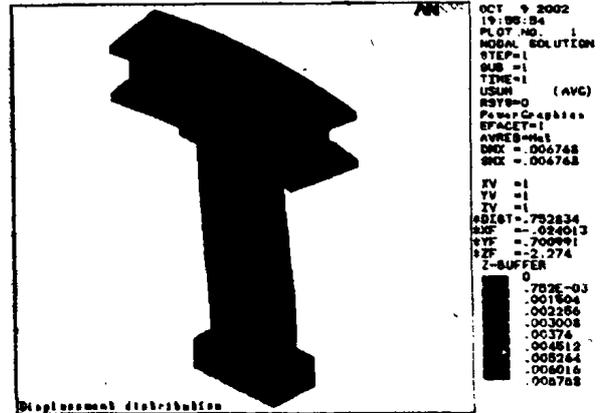


图 9 一阶失稳结果

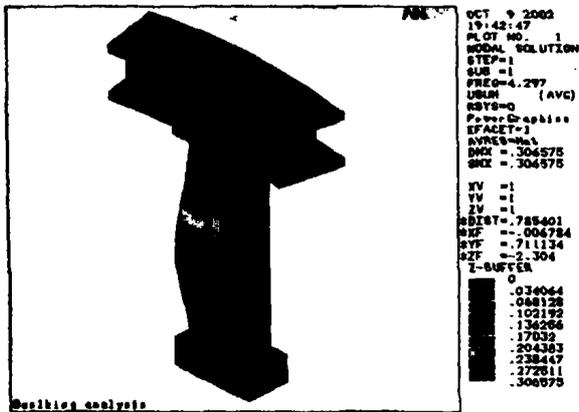


图 8 位移分布图

4 结束语

要获得一个理想的结构参数,还应通过具体的计算数据得到,由于结构的复杂性,很难仅从理论上进行计算,随着电子计算机的发展和各种有限元分

析软件在现实中的应用,大大节省计算的工作量。将该支撑结构用于 HT-7U 这种大型装置还要通过各种计算和实验的方法进行计算和分析,不断地调整结构中的各项参数,不断优化设计,使之更加成功合理。

参考文献:

- [1] Wu S T, Weng P D. The Project of HT-7U and Its Progress [R]. Beijing: Presented at "MT-15", 1997.
- [2] 吴雪冰. HT-7U 纵场磁体结构分析及螺管型实验 [R]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 1999.
- [3] Bondarchuk E, Krasnov S, Panin A, et al. Review of the HT-7U supporting systems [R]. Hefei: Attachment No. 1 to the Agreement for Research Cooperation Between the D V Efremov Institute and the Institute of Plasma Physics of the Chinese Academy of Science, 1999.
- [4] Tamura H, Imagawa S, Hayashi H, et al. Structural and Mechanical Design of Cryogenic Support System for LHD [J]. Fusion Techn., 1996, 1019 - 1022.

PROJECT OF CRYOGENIC SUPPORT SYSTEM FOR THE HT-7U SUPERCONDUCTING TOKAMAK

CHEN Xian-zhong, WU Song-tao

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

Abstract: Flexible support structure of the HT-7U superconducting tokamak cryogenic supports is introduced. Project of support structure that carries the total weight of the superconducting poloidal field magnet system and the toroidal field magnet system is designed. Thermal force, electromagnetic force and stability of cryogenic support system are analyzed.

Key words: Superconducting tokamak; Flexible support; Finite element analysis