

文章编号:0258-0918-(2003)02-0161-04

HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构分析

陈先忠, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 1126 号信箱 230031)

摘要:介绍一种叠板式柔性支撑结构以及该结构用于 HT-7U 超导托卡马克装置中的特点, 并介绍了有限元分析法在支撑系统分析中的应用, 计算在各种载荷作用下支撑结构在的极限应力及应力分布状况, 为结构设计的各项参数提供必要的理论依据。

关键词:超导托卡马克; 柔性支撑; 有限元分析

0 引言

HT-7U 超导托卡马克装置是大型非圆截面的受控热核聚变实验装置, 是国家“九五”重大科学工程项目, HT-7U 主机装置主要由中心螺管、超导纵场磁体、真空室、内外冷质、外真空杜瓦、支撑结构等几大部件组成。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质量以及部分电磁力与热收缩力, 保证纵场系统的精确安装位置, 保证纵场系统与基础间良好的电、热绝缘。本文主要阐述 HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构的设计过程, 首先对支撑结构做定性分析, 最后通过有限元分析软件进行数值分析, 以达到优化结构参数的目的。

1 HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构简述

作为支撑结构主要是为了支撑静载荷或动载荷, 结构的失效主要是由于应力的的大小超过

了材料的许用应力所致, 一般通过降低应力或选用高强度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定位, 保证纵场系统与基础间的良好电、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的影响等问题。

单组支撑结构如图 1 所示, 它是由复合材料连接结构、冷却块和叠板结构 3 部分组成, 整个支撑结构是由 16 个这样的结构均布在半径为 2 295 mm 的圆周上, 在稳定工作状态, 支撑底部座落在室温的外真空杜瓦上, 冷却块中采用液氮冷却。支撑顶端与纵场磁体系统相连, 纵场及其部件的重量为 200 t, 纵场处于液氮温度。

叠板结构是采用多块薄板通过螺栓连接而成, 叠板间有一定的间隙, 对于单块薄板来

收稿日期:2002-07-16; 退改日期:2002-11-22

作者简介:陈先忠(1971—), 男, 博士生, 从事结构设计及力学计算;

武松涛, 博士生导师。

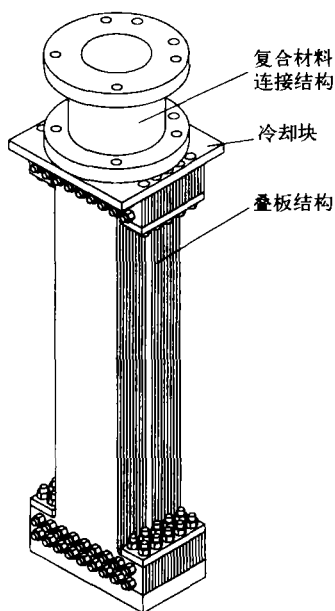


图1 单组支撑结构

Fig.1 One of cryogenic support

说,其垂直于薄板方向的抗弯刚度(EI_z)远小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。

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。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。

2 支撑结构计算及分析

2.1 支撑结构材料选用

低温机械的设计最终会面临两个问题,其一是选择用来制造这种装置的合适材料;其二是进行所选材料在工作条件下的强度计算。与一般的工程设计不同,低温设备材料的选择在很大程度上受低温的工作条件和材料的机械和物理性能的制约。在保证连接结构的强度条件下,选用玻璃纤维增强复合材料(如 G10)与低温状态的纵场结构相连,可以大大降低结构对低温磁体系统的热负荷,这是因为在聚合物化合物中,可以认为没有自由电子导热,其热传导决定于晶格振动,比金属或合金低,也就是说,其导热系数小;一般复合材料的导热系数是金属的 $1/100 \sim 1/1000$ 。另外在冷却块位置采用液氮冷却也是为了进一步降低结构对低温磁体系统的热负荷。

冷却块和下部的叠板结构采用 316LN (304) 不锈钢,它无延性转变温度 NDT,一般在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,奥氏体不锈钢属于面心立方晶格结构,不存在脆性转变温度,在低温下具有良好的塑性和韧性,此外,316LN (304) 不锈钢还有低温抗磁性。

2.2 支撑结构强度计算

2.2.1 叠板结构

计算复杂结构的受力情况用有限元法是目前最有效的办法,在这里采用有限元分析软件 ANSYS 对支撑结构进行力学行为分析。基于对称性,选一个单个支撑为分析对象,采用实体建模,薄板工字型直段用六面体单元,上下段用四面体单元,计算结果如下:

(1) 应力分析

a. 边界条件:仅有温度载荷,底端采用全约束,底端 300 K,顶端 80 K。计算的由于温度引起的应力大小为 226.4 kg/cm^2 ,顶端垂直位移

为 1.5 mm。

b. 边界条件: 无温度载荷, 支撑顶端纵场重力 12.5 t, 底端采用全约束, 计算的应力大小为 154.8 kg/cm², 最大位移为 0.04 mm。

c. 边界条件: 无温度载荷, 支撑顶端纵场重力 12.5 t, 顶端水平方向施加各种不同大小的力, 底端采用全约束, 计算的最大应力及水平位移列于表 1。

表 1 计算最大应力和水平位移

Table 1 Maximum Stress and horizontal displacement by calculation

水平方向力/g	0	100	200	300	400	500
最大应力/(kg·cm ⁻²)	115	214	315	422	540	663
最大位移/mm	0	1.5	2.9	4.4	5.8	7.3

图 2 是在无温度载荷, 支撑顶端纵场重力 12.5 t, 顶端水平方向施加 500 kg 大小的力, 底端采用全约束时, 应力分布及变形图。

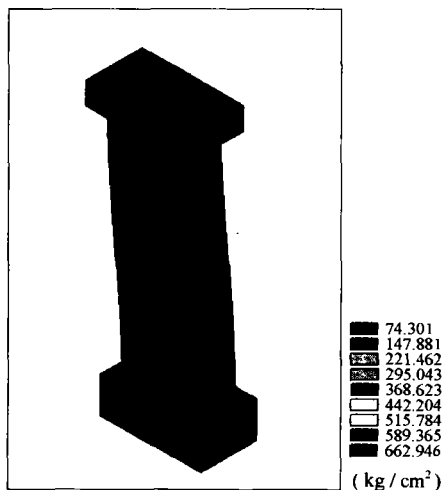


图 2 应力分布图

Fig. 2 Stress distribution

(2) 稳定性分析

底部为固定约束, 顶端为自由状态, 计算的临界力大小为 38.3 t, 而实际承载 12.5 t, 安全系数可以达到 3.06, 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, 支撑的顶端实际上并非自由, 由欧拉公式:

$$F_b = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}$$

得, 临界力 F_b 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, 两端为固定状态时为 0.65, 一端固定, 另一端自由时为 2.1。因此, 整个支撑结构的临界力的大小应该超过 38.3 t; 当取两个支撑结构为研究对象时的计算结果为临界力 250 t, 而实际承载 25 t, 安全系数可以达到 12.7。

2.2.2 复合材料连接结构

(1) 边界条件: 底端全约束, 顶端施加 12.5 吨的均布载荷。

计算结果: 最大应力为 900.8/cm²。

(2) 边界条件: 底端全约束, 顶端施加 12.5 t 的均布载荷, 同时在顶面施加不同大小的水平作用力。

计算结果: 图 3 为水平作用力为 500 kg 时的应力分布, 表 2 为不同水平作用力下, 复合材料上的最大应力大小。

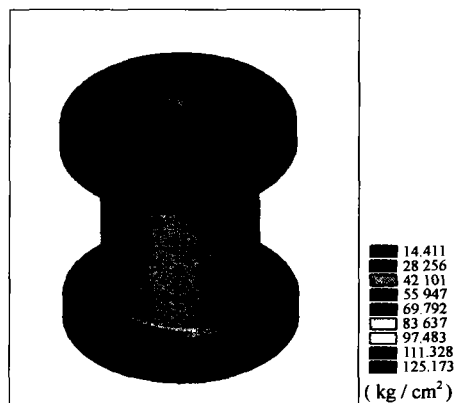


图 3 应力分布图

Fig. 3 Stress distribution

表 2 为在不同水平作用力下的最大应力

Table 2 Maximum stress at different levels of force

侧向力/ kg	300	400	500	600	700	800
最大应力/ kg·cm ⁻²	112.54	119.43	125.17	133.22	140.12	147.02

2.3 支撑结构传热分析

支撑结构对纵场磁体系统的漏热直接影响到超导的性能。如果漏热量太大,就会消耗更多的液氮量,使低温冷却系统负荷增加,这也是设计所不允许的,所以要控制支撑结构对纵场磁体系统的漏热。以下是分别计算支撑结构对冷却块以及复合材料连接结构对纵场磁体系统的漏热量。

2.3.1 叠板结构

在只考虑热传导的条件下,对叠板结构采用实体建模的方式,边界条件是:顶端温度为80 K,底端温度为300 K,计算的热流分布如图4,通过单个叠板支撑结构的漏热为58.8 W,整个叠板支撑结构的漏热为940 W。

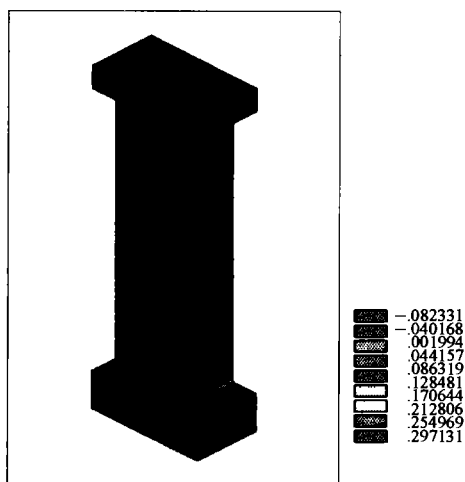


图4 叠板热流分布图

Fig. 4 Heat flow distribution between laminates

2.3.2 复合材料连接结构

在只考虑热传导的条件下,根据复合材料连接结构的轴对称性,建立有限元模型时可以采用简化的二维面单元。

边界条件:支撑结构顶端4.5 K,底端80 K。

计算结果:温度及热流分布如图5,单个支撑结构对纵场的漏热为1.115 W,整个支撑结构的漏热为17.83 W。

3 总结

对于该薄板式支撑结构,在稳定工作状态

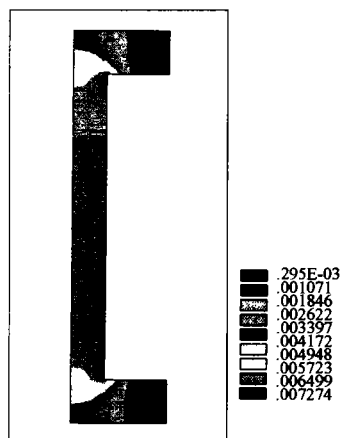


图5 复合材料连接结构热流分布

Fig. 5 Heat flow distribution in the connection structure of composite

下,温度引起的应力主要发生在底部,大小与底部的约束条件有关。上述计算结果是取保守状态,应力大小也远小于许用应力。纵场重力作用下的最大应力发生在工字型薄板的上直段和垂直段交界的边界处;从计算结果看,危险应力主要还是由于薄板的弯曲引起的,应力大小与顶端水平力有关。从计算数据中得到,最大应力和位移与顶端水平力近似成线性关系,而纵场计算的热收缩水平位移还不到7 mm,最大应力还不到530 kg/cm²,在允许用应力范围内,从应力分布图看,最大应力分布在工字型薄板垂直段的根部,其大小与薄板的数量无关,只与支撑的高度和顶端位移有关,因此该结构主要解决的问题是稳定性,即垂直临界力的值,其大小与薄板数量及薄板厚度有关,从计算结果看,该支撑结构满足设计要求。

参考文献

- 1 WU S T, Weng P D. The Project of HT-7U and its Progress. presented at "MT-15", Beijing, Oct. 20-24, 1997
- 2 Yu J, Pan Y N, et al. Finite element analysis on the HT-7U TF coil case. Symposium of the TH-7U Design, ASIPP, Jan. ,1998
- 3 张允真等. 弹性力学及其有限元法. 1988

(下转第172页, continued on page 172)

resin content by fiber reinforced cement[J]. J. Nuclear Science and Technology, 1992, 29(11):1093~1099.

23 E Benavides. Extraction of resins from WD-22 tank in Jose

Cabrera Nuclear Power Plant. SIEN 97 Bucharest, Romania, Oct. 24-25, 1997

Optimizing the Management of Spent Ion Exchange Resin

LUO Shang-geng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract: Safety treatment, conditioning and disposal of spent ion exchange resin (SR) from nuclear facilities is a hot topic. The SR features, various treatment and conditioning methods, such as filling into the high integrity container after drying and dewatering, elution, hot compaction, biodegradation, incineration, wet oxidation, bituminisation and vitrification are described in this paper. Especially, the cementation is expounded in detail. The swelling mechanism of cemenlired spent resins and preventative measures are discussed. It is pointed out that the cementation formulation has to be given more attention and the key point is to comply with disposal requirements. Finally, comments and suggestions for optimizing the management of spent resins are addressed.

Key words: spent resin; optimizing treatment; conditioning; cementation; swelling; nuclear power plant; solidification form; disposal

(上接第 164 页, continued from page 164)

Analysis of Cryogenic Support System for HT-7U Superconducting Tokamak

CHEN Xian-zhong, WU Song-tao

(Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Heifei of Anhui Prov. 230031)

Abstract: A laminated flexibility support system and its characteristics in the HT-7U superconducting Tokamak are discribed in the paper. The application of finite element analysis to the support system and the calculation of limit stress and stress distribution in support system under variations loadings provide theoretical basis to all parameters in the structure design.

Key words: superconducting Tokamak; flexibility support; finite element analysis