

ITER 极向场过渡馈线结构设计及稳态热分析

陈科¹ 蒋新鹏¹ 宋云涛² 刘素梅² 陆坤² 陈永华² 张善文³

1. 合肥工业大学, 合肥, 230009 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031

3. 扬州大学, 扬州, 225127

摘要: 根据国际热核聚变实验堆(ITER)装置对馈线的设计要求,同时考虑过渡馈线的结构复杂性,利用三维设计软件 CATIA 对过渡馈线系统各部件进行了结构设计,并运用有限元分析软件 ANSYS 建立了典型的过渡馈线有限元模型,模拟了系统所在的真空和低温环境下馈线的稳态传热情况,得到了内部零部件的温度分布和低温管路的热负荷情况,为进一步结构优化及试制奠定了重要基础。

关键词: 国际热核聚变实验堆;极向场;过渡馈线;结构设计;热分析

中图分类号: TL626 **文章编号:** 1004—132X(2011)22—2658—04

Structure Design and Steady-state Thermal Analysis of ITER Poloidal Field Cryostat Feeder—though

Chen Ke¹ Jiang Xinpeng¹ Song Yuntao² Liu Sumei² Lu Kun² Chen Yonghua² Zhang Shanwen³

1. Hefei University of Technology, Hefei, 230009

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031

3. Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, 225127

Abstract: According to the ITER design requirements for Feeder, and simultaneously considering the complexity of CFT structure, all components of CFT were designed and modeled based on CATIA software. In order to simulate the steady heat transfer of the system in the vacuum and cryogenic environment, finite element analysis (FEA) thought was employed. A typical FEA model of CFT was established based on ANSYS software. The internal component temperature distribution and the cryogenic pipeline thermal load were obtained, which lay an important foundation for further structural optimization and prototype trial.

Key words: international thermonuclear experimental reactor(ITER); poloidal field(PF); cryostat feeder—though(CFT); structure design; thermal analysis

0 引言

国际热核聚变实验堆(international thermonuclear experimental reactor, ITER)是一项正在进行的大型国际合作项目,其目的是研制一个可以自持燃烧的托卡马克核聚变实验堆,用来验证热核聚变反应堆的工程可行性和可靠性,对实际应用核聚变能所需要的各种要素进行试验^[1]。磁体馈线系统的研发由国际组和中方共同负责实施,其设计过程是一个反复并不断论证的过程。2005 年张远斌等^[2]根据馈线系统布线流程图对结构作了概念设计和分析;之后王建青等^[3]分析了热传导对低温管路的影响,但其未考虑冷屏与内管之间的辐射及外管通过冷质支撑对低温管路的热传导;2010 年 Song 等^[4]对馈线系统作了整体结构研究。出于设计和安装的需要,磁体馈线

系统从磁体线圈接头开始向装置外侧依次为内馈线、过渡馈线、S 弯盒、线圈终端盒及干盒。本文以极向场(poloidal field, PF)磁体线圈馈线系统为例,对过渡馈线系统的相关部分进行了详细结构设计,给出了超导母线支撑、管路支撑及冷质支撑的具体结构形式,明确提出了以内管、冷屏及外管为主体的三层套管结构,并分析了低温管路的热漏情况,为设计工作提供依据,具有一定的参考价值。

1 设计要求及材料的选择

过渡馈线是超导母线(Busbar)、低温冷却管和测量诊断线管等穿越生物屏蔽层,进入装置内部的通道^[5]。其中, Busbar 为磁体线圈提供电源,采用迫流冷却,使用 NbTi 超导材料,超导态临界温度为 9.3K。另外, ITER 装置内的磁体线圈使用 Nb₃Sn 超导材料,临界温度为 18.1K,并且它由独立贯穿于整个馈线中的冷却回路为其提供冷却源。为了保证它们的超导性能和较大的载

收稿日期:2010—11—23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2008CB717906);国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项(2008GB102000)

流能力,采用超临界氦冷却,这就要求超临界氦流经的低温管路的温度必须维持在 4.2~5.2K 之间。该温度范围与环境的温差很大,低温管路较小的热负荷要求使得结构设计的难度进一步增大。结构设计中主要采取减小接触面积、使用绝热材料、设置冷屏等措施来尽量减小外界对低温管路的热负荷,以保证在工作时 Busbar 和磁体线圈不会因热负荷过高而出现失超的情况,以及增加制冷机的功率。

极向场磁体线圈馈线系统典型结构如图 1 所示。

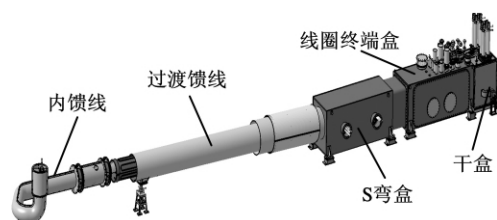


图 1 极向场磁体线圈馈线系统典型结构

过渡馈线是长度约为 10m 的直线段,设计中要考虑:①在降温过程中,外管内的零部件会产生轴向收缩,因此,要保证相关结构的可滑动性,避免造成应力过大;②增大室温部件与支撑对超导母线及低温冷却管的热阻,确保内部低温部件热损耗最低;③易加工性和可维修性。

在系统运行时,过渡馈线处于真空度约为 10^{-4} Pa、温度范围为 4.2K 至室温及磁场强度最大为 1.7T 的环境中,这就要求材料不仅要满足要求的强度、刚度,还要具备较好的低温性能、无磁性及较好的焊接性。综合考虑后选择如下材料:①根据温区不同,金属材料选择奥氏体超低碳不锈钢 304L 和 316L;②为降低支撑对相接触处的低温管路的传热,所有与低温部件相接处的部分均选用绝热材料 G10,G10 属于环氧基玻璃增强复合材料,具有密度小、强度高、绝缘及绝热性好,易于加工成形等特点。

2 过渡馈线的结构设计

2.1 内部结构

Busbar、低温冷却管和测量诊断线管是馈线系统的核心通道,它们由各自的支撑布置在内管里,相关结构如图 2 所示。

装置在运行时,其周围将产生由里向外逐渐衰减的磁场,而且 Busbar 之间也会产生电磁场。在外场和自场的环境下,Busbar 上的电磁力最高达 10^4 N/m,为平衡电磁力,Busbar 以正负成对方式布置,通过支撑固定在隔板两侧,Busbar 之间

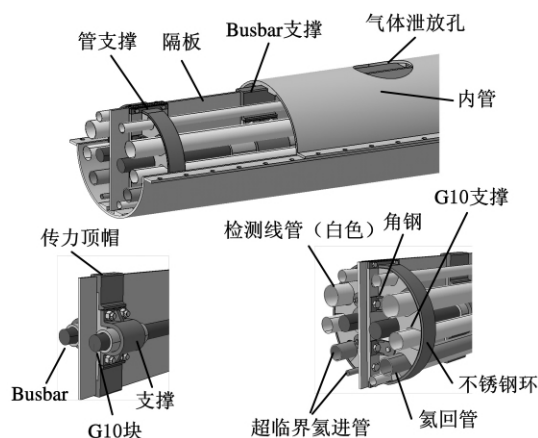


图 2 典型内部结构

的电磁力将以内力的形式最大程度地抵消^[2]。支撑的分布间距要与磁场强度相适应,使两支撑之间的 Busbar 应力或应变趋于一致。在支撑的上下两端分别加一个传力顶帽,卡在内管的滑槽中,一方面通过减小接触面积以降低外部对 Busbar 的传热,同时也可在支撑受到扭矩时,减小隔板的变形。

受内管空间的限制,Busbar 支撑和管支撑间隔布置。两种支撑相互独立,便于零部件的装配,增加结构的安全可靠性。冷却管和测量线管呈圆形分布在管支撑内 G10 支撑的半圆槽上,与外部不锈钢环共同承受管的重力载荷,同时在 G10 支撑和绝热板之间加有角钢,以提高结构的强度。管支撑不与内管接触,以减少传热,内管内的所有零部件都由传力顶帽支撑。另外,如果冷却管突然破裂,会造成该处相邻管路支撑之间的压力迅速增加,所以在两个管路支撑之间的内管上开气体泄放孔,使气体能快速释放到杜瓦空间中,以确保结构的安全。

2.2 冷屏

在装置运行情况下,Busbar 和冷却管路内通入的是超临界氦,为了减小它们的热负荷,在内管和室温外管之间设置低温屏蔽层——冷屏(图 3),以减少来自室温部件对内部低温部件的辐射热。

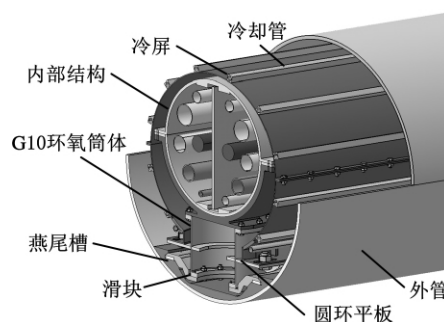


图 3 过渡馈线典型截面

冷屏的温度要保持在 80~100K 之间,焊接在冷屏上的冷却管道内充入 80K 的氦气。冷却管布置的间距决定冷屏的温度分布,间距小,可得到很好的冷却效果,但浪费管材,增加压降;间距过大会使冷屏不能很好地冷却^[6]。因此,冷却管采用沿圆周方向 30° 间距布管,蛇形排列,并采用氩弧焊焊在冷屏壳体上,壳体是 3mm 厚、外径为 620mm 的不锈钢钢管,冷却管道是内圆外方管,内截面 $\phi 18\text{mm}$,外截面 $22\text{mm} \times 22\text{mm}$,由于冷屏直径远远大于方管边长,焊接后保证了接触面积以增加传热。

2.3 外管及冷质支撑

外管是连接装置杜瓦孔和 S 弯盒的不锈钢管,并为内部零部件提供真空、低温环境。由于过渡馈线系统是内部结构、冷屏和外管三层嵌套结构(图 3),故需要冷质支撑把内部结构和冷屏支在外管里,内管和冷屏能在冷收缩和外力作用下沿轴向相对滑动,且具有良好的绝缘、绝热和机械性能。该支撑设计为壁厚 10mm 的 G10 环氧筒体,上端通过法兰面连接内部结构,中间固结圆环平板来支撑冷屏,同时对筒体的机械性能起到一定的加强作用,下端与放置在外管里的燕尾槽上的滑块相连。

3 过渡馈线的稳态传热分析

3.1 传热基本原理及其有限元理论

在自然界和工程实际中发生的大量传热过程,可分为热传导、对流和热辐射三种传热方式。在过渡馈线系统的热模型中,由于外管内部处在高真空环境中,对流换热极小,分析时不予考虑。其中,三维热传导温度场控制偏微分方程由傅里叶定律得到:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{\Phi}$$

式中, ρ 、 c 、 λ 分别为材料的密度、比热容和导热系数; T 为结构的瞬态温度; τ 为时间; $\dot{\Phi}$ 为内热源强度。

$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$ 为微元体的能量增量,是瞬态项,令其等于零即得到稳态温度场方程。

由于内部结构被包容在整个冷屏的内部,面与面之间的辐射传热的基本公式为

$$Q = A \frac{\sigma [(\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4]}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

式中, Q 为辐射能量; A 为辐射表面积; $\sigma = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T_1 、 T_2 为两辐射面的表面温度; ϵ_1 、 ϵ_2 为表面辐射系数,按不锈钢抛光面

取 0.1。

由于馈线系统形状复杂,理论计算难度很大,可以利用有限元法对其温度场进行数值模拟。将求解区域划分为有限个单元,将温度场离散到每一个节点上,最后把所有单元在整个区域上合成,得到平衡方程,写成矩阵的形式是^[7-8]:

$$KT + CT = P$$

式中, K 为热传导矩阵; C 为热容矩阵; T 为节点温度矩阵; \dot{T} 为节点温度对时间 τ 的导数矩阵; P 为温度载荷矩阵。

在时间域对上式离散得

$$(K + \frac{C}{\Delta \tau})T_\tau = \frac{C}{\Delta \tau}T_{\tau-\Delta \tau} + P_\tau$$

通过迭代计算即可得到任意时刻节点温度 T 。

3.2 有限元模型的建立

过渡馈线系统模型复杂但具有典型结构的特点,选取位于冷质支撑处 0.4m 的一段作为分析模型,由于热传导和辐射导致此段低温管路的热漏最大,若该段的热漏符合要求,则其他单位长度上的热漏也是满足设计的。根据经验简化了对热分析结果影响不大的结构,如螺栓、测量线管、圆角等。由于传热分析并不关注冷屏与外管的辐射换热,所以省去外管,只考虑外管内燕尾槽上的滑块通过环氧筒体向上的热传导。基于 CATIA 软件建立简化模型,并通过文件格式转换后导入到 ANSYS 软件中,选用实体单元 Solid70,划分网格后模型的单元数为 53 597 个,节点数为 15 866 个。简化模型和有限元模型如图 4 所示。

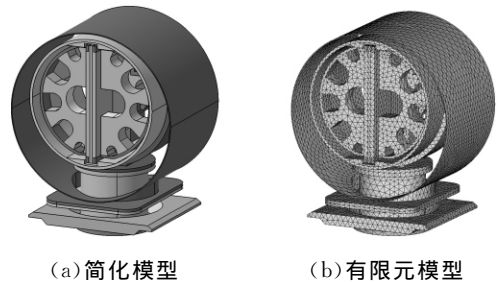


图 4 简化模型和有限元模型

3.3 边界条件的设定

在母线、冷却管和支撑的接触面上加温度载荷 4.5K,考虑到辐射热量与温度的 4 次方成正比,消耗计算资源很大,并且这些低温管路的管径相对于外部空间很小,故忽略它们与外界的辐射换热;工作时冷屏的温度稳定在 80~100K 之间,保守起见,在冷屏上加固定温度载荷 100K,并在冷屏内表面与内管外表面之间设置辐射对;滑槽上与外管接触的面上加载 300K 的温度载荷。

3.4 有限元分析结果

图 5 给出了整体模型及环氧筒体的温度分布

情况,并得出环氧筒体温度在 298.4K 至 31.9K 间变化,温度梯度比较明显,表明其热阻大,绝热性好。

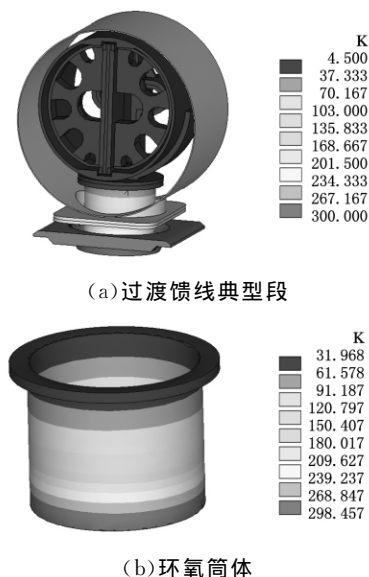


图 5 过渡馈线典型段和环氧筒体温度分布图

环氧筒体上的支撑平板通过与冷屏连接,进一步减小了筒体下部热量向内管的传递,起到了热截止的作用。零部件全部由 Busbar 支撑的传力顶帽支撑在内管里,而管支撑并不与内管接触,进一步减少了热量向低温管路的传递。图 6 给出了内部结构的温度分布。分析得到低温管路的热负荷为 1.4W,满足了 ITER 馈线系统的设计要求。

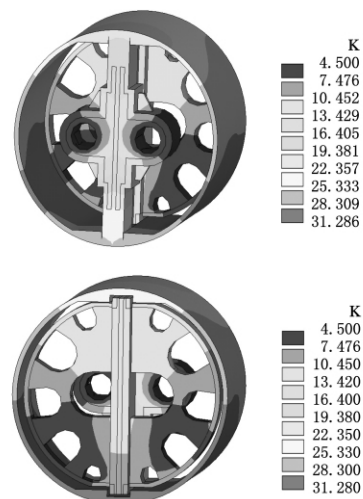


图 6 内部结构温度分布云图

4 结论

(1)过渡馈线系统采用了以内管、冷屏及外管三层套管为主体的结构形式,通过滑槽结构保证

了低温收缩和外力作用下,外管内的零部件只沿轴向移动,减小了应力。

(2)过渡馈线的主要作用是保证 Busbar 的超导性能和通过冷却管进入磁体线圈的超临界氦的温度,通过 ANSYS 稳态热分析得到了热平衡时该段馈线的温度分布和低温管路的热负荷。

(3)分析结果表明,结构设计是可行的,并且热传导在传热过程中占主要地位,结构设计时应尽量考虑减少部件间的接触面积,以增大热阻,为下一步原型件的试制和实验提供初步依据。

参考文献:

- [1] Aymar R. Status of ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61/62:5-12.
- [2] 张远斌,武松涛,宋云涛,等. ITER 超导馈线系统的设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2005, 25(3):195-199.
- [3] 王建青,刘利斌,武松涛. ITER 过渡馈线辅助支撑结构设计及传热计算[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8):716-719.
- [4] Song Y, Bauer P, Bi Y, et al. Design of the ITER TF Magnet Feeder Systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3):1710-1713.
- [5] Bauer P, Sahu A K, Sato N. The ITER Magnet Feeder Systems Functional Specification and Interface Document[R]. Cadarache: ITER I. O., 2009.
- [6] 陆坤,程勇,王忠伟. ITER 超导馈线系统中 TF 线圈终端盒冷屏的设计[C]//第九届全国低温工程大会. 合肥, 2009: 337-341.
- [7] 王勳成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [8] 潘显坤,余建祖,高红霞. 航空电子元器件稳态和瞬态热分析[J]. 电子机械工程, 2005, 21(1):22-25.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:陈 科,男,1965 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。研究方向为现代设计理论和方法、并行设计、机械 CAD/CAM、数字化设计与制造。发表论文 60 余篇。蒋新鹏(通讯作者),男,1986 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。宋云涛,男,1973 年生。中国科学院等离子体物理研究所研究员、博士研究生导师。刘素梅,女,1967 年生。中国科学院等离子体物理研究所博士研究生。陆 坤,男,1976 年生。中国科学院等离子体物理研究所博士研究生。陈永华,男,1977 年生。中国科学院等离子体物理研究所博士研究生。张善文,男,1983 年生。扬州大学机械工程学院硕士研究生。