

ITER 校正场线圈过渡馈线真空隔断传热及热应力分析*

张善文¹ 张剑峰¹ 宋云涛² 王忠伟² 刘素梅² 陆坤² 陈兆杰³ 蒋新鹏⁴

(¹扬州大学 机械工程学院,扬州 225127) (²中国科学院 等离子体物理研究所,合肥 230031)

(³安徽理工大学 机械工程学院,淮南 232001) (⁴合肥工业大学 汽车与机械工程学院,合肥 230031)

Heat transfer and thermal stress analysis for vacuum barrier of ITER CC cryostat feed-through

ZHANG Shan-wen¹, ZHANG Jian-feng¹, SONG Yun-tao², WANG Zhong-wei²,

LIU Su-mei², LU Kun², CHEN Zhao-jie³, JIANG Xin-peng⁴

(¹School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(²Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(³School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

(⁴Machinery and Automobile Engineering College, Hefei University of Technology, Hefei 230031, China)

【摘要】ITER 校正场线圈馈线系统的真空隔断是过渡馈线中的重要组成部分,位于 S 弯盒与过渡馈线的接口处,用以保证 S 弯盒和过渡馈线中不同真空系统的独立性,便于系统维护。针对真空隔断的作用,介绍了其设计结构,使用 ANSYS 软件建立了真空隔断的热及结构有限元模型,考虑到热传导、热辐射及外部自然对流对真空隔断工作环境的影响,计算了其温度分布、低温区的热载及其热应力,结果验证了真空隔断结构设计的可行性,为真空隔断的进一步优化及试制奠定基础。

关键词: ITER; 真空隔断; 传热; 热应力

【Abstract】The vacuum barrier of ITER correction coil (CC) Feed System is an important component of cryostat feed-through (CFT) which locates at the interface between S-Bend box and CFT in order to ensure the independence of the different vacuum systems of S-Bend box and CFT and facilitate system maintenance. According to the function requirement it introduces its design, establishes a thermal and mechanical finite element model of the vacuum barrier in ANSYS software. Considering the thermal conduction, radiation and effect of outside natural convection on the working scenario of the vacuum barrier its temperature distribution, heat load of the cryogenic system and the thermal stress is then calculated which results proves the feasibility of the design of the vacuum barrier and provides support for the further optimization and test of the vacuum barrier.

Key words: ITER; Vacuum barrier; Heat transfer; Thermal stress

中图分类号: TH16, TL62+6, TL64 文献标识码: A

1 引言

国际热核聚变实验堆 ITER 是一项正在研究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时所需要的各种要素进行试验。校正场线圈馈线是磁体馈线系统的重要组成部分,其内部是由两对超导母线、四对低温冷却管和四对测量控制线路等一系列管、缆、线组成。按照所处于杜瓦位置的不同,该馈线又分为内部馈线、过渡馈线、S 弯盒、线圈终端盒(包括干盒),其结构布置如图 1 所示^[1]。

校正场线圈馈线系统的真空隔断是过渡馈线中的重要组成部分,位于 S 弯盒与过渡馈线的接口处,设置的目的是为保证 S

弯盒和过渡馈线中不同真空系统的独立性,便于维护。贯穿其内部的超导母线是磁体校正场线圈正常工作的电流通道,其导体材料为超导材料 NbTi,采用 4.5K 超临界氦冷却,确保超导体的运行环境。此外,四对冷却管路为磁体线圈提供冷却源。为保证磁体馈线的正常运行,降低低温管路的热负荷,设计中需要重点考虑结构的传热问题。同时,低温管路自身的冷收缩以及其与室温零部件之间由于温度梯度较大,会产生较大的热应力,这也是设计过程中必须要考虑的。针对以上情况对真空隔断进行了结构设计,利用传热学及弹性力学的基本理论,运用 ANSYS 分析软件建立真空隔断有限元模型,得出了其温度分布、热应力分布及低温管路的热漏,验证设计的可行性。

* 来稿日期: 2011-02-06 * 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2008CB717906), ITER 计划专项支持项目(2008GB102000)

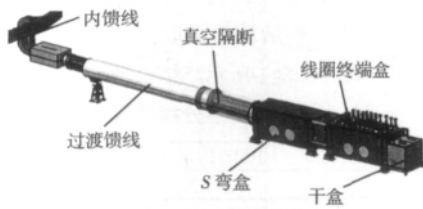


图 1 校正场磁体线圈馈线系统典型结构

2 真空隔断结构设计

超导母线、低温冷却管和测量控制线路是馈线系统的核心部件，它们呈圆形分布在外管内部，贯穿于真空隔断的隔板，隔板对其起支撑和导向作用，整体结构如图 2 所示。外管连接过渡馈线和 S 弯盒的不锈钢钢管，为内部零部件提供真空和低温环境。在正常试验运行情况下，超导母线和冷却管的工作温度为 4.5K，为降低来自室温外管对它们的辐射和传导热负荷，设计采用了如下结构：

(1) 在外管和低温管路之间设置冷屏，屏蔽了外管在室温下的辐射热流；

(2) 在隔板的环向设置热截止，使冷屏与隔板间接相连，阻断外管的传导热流，同时为防止外管降温过快而结霜和降低外管对热截止、冷屏和隔板的传导热负荷，设置“几”字形截面的双层颈管，延长了外管与热截止、冷屏及隔板之间的传热路径，增大了热阻；

(3) 由于低温管路在重力、热载荷和电磁力等载荷作用下会产生相对于外管轴向的伸缩位移，因此在隔板和它们之间设置波纹管，可允许低温管线的轴向伸缩位移，同时延长导热路径，减少低温管线的热载。另外，为防止波纹管受到扭矩发生破坏，设置保护套，只允许波纹管有轴向相对滑动，限制其转动；

(4) 在波纹管和超导母线之间设置径向绝缘子，增大隔板与超导母线之间的热阻，减少传导热流，同时起到了绝缘作用^[2]。

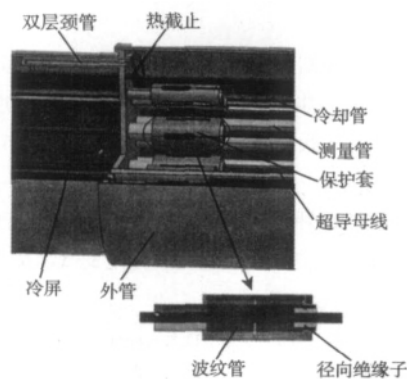


图 2 真空隔断几何模型

3 传热及热应力计算基本原理

3.1 热对流数学模型

真空隔断外管受到室温下的空气对流，用牛顿冷却方程来描述如下：

$$q = h \times (t_w - t_f) \quad (1)$$

式中 q —热流密度， W/m^2 ； h —对流系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； t_w —外管外表面温度， K ； t_f —空气温度，即室温， K ；

3.2 热传导数学模型

三维稳态无内热源导热微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \times \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \times \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \times \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

式中 T —温度场变量， K ； λ —导热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

在正常试验运行情况下，真空隔断中，外管在空气对流条件下会有一个比较稳定的温度值，冷屏和管缆线等也近似处于各自稳定的温度值，因此，真空隔断中的导热问题的边界条件可看作是第一类边界条件^[3]。

3.3 热辐射数学模型

热传导和对流都需要传热介质，而热辐射无需任何介质，在真空中辐射能的传递最有效。真空隔断中面与面之间的辐射热传递用以下近似公式计算：

$$Q_{rad} = A \times C \times \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (3)$$

式中 Q_{rad} —辐射能量， W ； A —辐射表面积， m^2 ； C —斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ； T_1, T_2 —辐射表面温度， K ； ϵ_1, ϵ_2 —表面辐射系数， 0.1 ；

3.4 热应力数学模型

热应力和热位移的计算可以采用弹性力学理论，将模型划分为有限个微小体单元，每个微元的热应力分量为 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ，热应变分量为 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ，位移分量为 u, v, w 。热弹性力学的基本方程包括平衡方程、几何方程和物理方程。

平衡方程为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

几何方程为：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

物理方程为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \lambda' \theta + 2G \epsilon_x - \frac{\alpha E T}{1-2\nu} \\ \sigma_y &= \lambda' \theta + 2G \epsilon_y - \frac{\alpha E T}{1-2\nu} \\ \sigma_z &= \lambda' \theta + 2G \epsilon_z - \frac{\alpha E T}{1-2\nu} \\ \tau_{yz} &= G \gamma_{yz} \\ \tau_{xz} &= G \gamma_{xz} \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在物体边界处 物体表面处面力为零 表面处位移为 $\bar{u} \ \bar{v} \ \bar{w}$, 则静力边界条件 :

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \sigma_x l + \tau_{yz} m + \tau_{zx} n \\ 0 &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n \\ 0 &= \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \end{aligned} \right\} \text{在 } S_\sigma \text{ 上} \quad (7)$$

和位移边界条件 :

$$\bar{u} = \bar{u} \ \bar{v} = \bar{v} \ \bar{w} = \bar{w} \text{ 在 } S_u \text{ 上} \quad (8)$$

式中 $\lambda' = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ $\beta = \varepsilon x + \varepsilon y + \varepsilon z$ E —弹性模量 ; α —线性膨胀系数 ; 式(7) S_σ —物体表面上面力为零的边界部分 $(l \ m \ n)$ — S_σ 上点的外法线 ; 式(8) S_u —物体表面上给定位移的边界部分 $(\bar{u} \ \bar{v} \ \bar{w})$ —属于 S_u 上点的已知函数^[4]。

由于真空隔断内部结构复杂, 微分方程很难获得其精确解析解, 下面将运用 ANSYS 分析软件 采用有限元方法计算其温度分布及热应力^[5-6]。

4 传热及热应力分析

4.1 有限元模型的建立

真空隔断的模型比较复杂, 且辐射传热在 ANSYS 中的计算量很大, 需对模型进行简化。对于形状比较复杂的径向绝缘子和波纹管采用等效传热单元。

为方便计算, 冷屏用空间节点代替。测量管的温度与冷屏基本一致, 因此, 不考虑其对 4.5 K 温区的热负荷。简化后的几何模型及有限元模型, 如图 3 所示。外管、隔板、波纹管、绝缘子等采用 SHELL131 辐射用 SURF152 和 MATRIX50 模拟, 网格为四边形网格, 单元数为 21882 个, 节点数目为 12600 个。

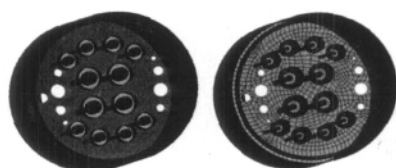


图 3 几何模型及有限元模型

4.2 传热分析

传热分析时 根据实际环境 施加相应的热边界条件。外管表面有自然对流, 对流换热系数为 $5W/(m^2 \cdot K)$, 室温 300K。冷却管和超导母线温度为 4.5K。冷屏及热截止温度均为 100K。各面间设置辐射对。模型中, 径向绝缘子的材料为环氧树脂, 其余各零部件均为不锈钢 316L。

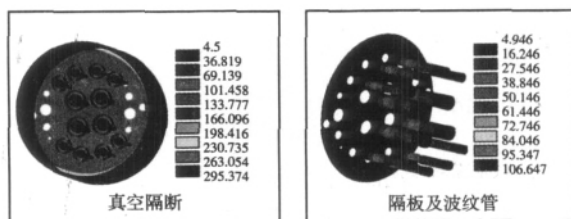


图 4 真空隔断及其零部件的温度分布

经计算得到真空隔断及其零部件的温度分布图, 如图 4 所示。外管温度最大值为 295K, 即 22℃, 高于露点, 双层颈管热阻较

大, 防止了外管表面结霜。隔板平均温度在 100K 左右。波纹管热阻大, 温度梯度大。经后处理提取出 4.5K 温区、100K 冷屏和 100K 热截止的热载, 如表 1 所示。结果满足 ITER 设计要求。

表 1 传热分析结果

4.5K 温区/W	100K 冷屏/W	100K 热截止/W
2.46	217.52	70.85

4.3 热-结构耦合分析

热-结构耦合分析采用间接法。将以上温度分析结果作为载荷加载于模型上, 限制外管两端口焊接处的所有自由度, 得到真空隔断的位移、热应力分布云图, 如图 5 所示。图中最大位移出现在靠近波纹管的冷却管端口, 为 7.738mm。最大热应力出现在双层颈管转弯处, 为 34.3MPa。

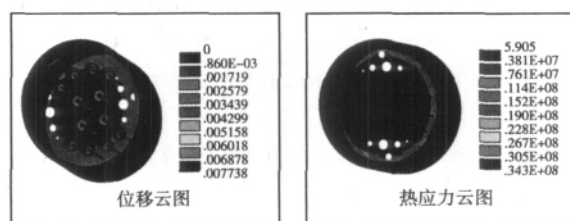


图 5 位移及应力云图

4.4 结果评定

根据美国 ASME 压力容器评定标准, 将应力分为弯曲应力 P_b 、薄膜应力 P_m 和热应力 Q 进行评定。经后处理提取出各应力值, 将结果评定, 如表 2 所示。结果均在许用应力范围内。

表 2 结果评定

应力结果/MPa	许用应力/MPa
$P_m=18$	$S_m=115$
$P_m+P_t=51$	$1.5S_m=172$
$P_m+P_b+Q=85$	$3S_m=345$

5 结论

(1) 根据真空隔断的真空低温环境及作用, 介绍了其设计结构。

(2) 针对真空隔断真空低温下的传热及热应力问题, 采用传热学和弹性力学的基本理论, 通过在 ANSYS 中建立真空隔断有限元模型, 计算了其低温区的热载, 得到其温度分布及应力分布云图。

(3) 经分析结果评定, 验证了真空隔断结构设计的可行性。计算方法及结果为真空隔断的进一步优化及试制奠定基础。

参考文献

- [1] Bauer P, Sahu A.K, Sato N. The ITER magnet feeder systems functional specification and interface document [R]. Cadarache: ITER I.O, 2009.
- [2] 康钦兰, 宋云涛, 王忠伟. ITER TF 馈线中 S 弯盒冷屏结构设计及热分析[C]. 第九届全国低温工程大会论文集, 2009, 332-336.
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第 3 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004, 4-279.
- [4] 吴家龙. 弹性力学(新 1 版)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 350-356.
- [5] 程亚丽, 鲍立曼, 宋云涛, 等. EAST 超导托克马克核聚变试验装置真空室窗口烘烤及热应力分析[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(5): 595-598.
- [6] 李玉, 陈良玉, 刘作军. 高炉铸铁冷壁的传热及热应力分析[J]. 机械设计与制造, 2008(6): 96-98.