

# 国际热核聚变实验堆过渡馈线设计与分析

张远斌, 宋云涛, 武松涛, 王建青

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, 简称 ITER)采用超导馈线系统传输磁体线圈所需电流、冷却液及数据信号等。文章涉及馈线系统中过渡馈线的设计,并通过有限元法对设计结构进行全面校核和应力分析。校核与应力分析结果为结构的进一步研制提供了理论依据。

**关键词:** 过渡馈线; S弯盒; 超导电流传输线; 双层绝缘

**中图分类号:** TL626; TH122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2006)03-0352-04

## Structural Design and Analysis of Cryostat Feedthrough for International Thermonuclear Experimental Reactor

ZHANG Yuan-bin, SONG Yun-tao, WU Song-tao, WANG Jian-qing

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

**Abstract:** International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) uses superconducting magnet feeder system to transmit current, liquid helium and instrumentation cables, which are needed for magnet coils. The structural design of ITER cryostat feedthrough is described. Based on the finite element analysis, the overall check and the stress analysis are carried out. It provides theoretical basis for further development of the structure.

**Key words:** cryostat feedthrough; S-bend box; superconducting busbar; double-insulation

国际热核聚变实验堆(ITER)是正在进行的一项大型国际合作项目,作为世界上最大的核聚变反应堆,ITER的目标是建造一座可自持燃烧的托卡马克聚变实验堆,以验证热核聚变反应堆的工程可行性,并对实际应用核聚变能时所需的要素进行试验<sup>[1]</sup>。磁体系统是ITER的重要部分,ITER全部采用超导磁体设

计<sup>[2]</sup>。ITER的磁体线圈通过馈线系统与诸如低温系统、电源供应系统、控制系统等外围系统相联系,以获得控制磁体系统运行所需的电源、冷却液和数据信号等。馈线系统中的过渡馈线是外围系统由杜瓦外部向杜瓦内部过渡的通道,因此,过渡馈线结构的可靠性直接关系到超导磁体的运行安全。

收稿日期:2005-04-05;修回日期:2005-09-26

基金项目:国家“973”项目资助课题(2004CB720704)

作者简介:张远斌(1974—),男,安徽含山人,博士研究生,机械设计专业

### 1 ITER 过渡馈线结构设计

ITER 磁体馈线系统共有 31 个结构相同或相似的过渡馈线,系统结构示于图 1。过渡馈线提供贯穿杜瓦及生物屏蔽层的通道,一端通过内部馈线与不同的磁体线圈相连,另一端连接终端盒,传递经由终端盒过来的电流、冷却

液等。过渡馈线结构复杂,包括各类低温传输线(用于超导磁体等部件的冷却)、数据传输线(用以超导磁体等部件的控制)、超导电流传输线(超导 Busbar,连接电流引线和磁体线圈,最大电流 68 kA)、接头部分以及外部的壳体部分(外壳体为内部创造了低温、真空环境)等。

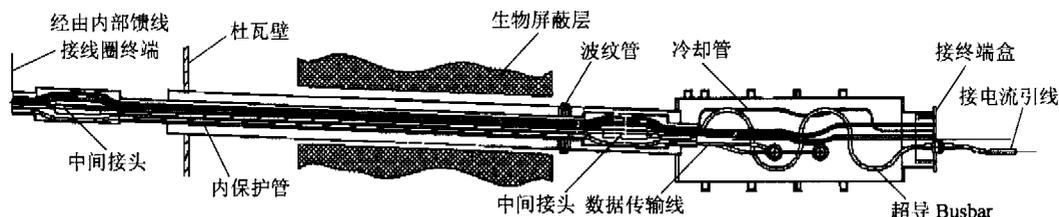


图 1 过渡馈线结构

Fig. 1 Structure of cryostat feedthrough

#### 1.1 电结构设计

过渡馈线是能量输入输出的通道,如果出现故障,对整个设备有着非常严重的影响,因此过渡馈线在结构设计上有很高的稳定性要求。为提高稳定性,过渡馈线中的 Busbar 采用双重接地绝缘及屏蔽结构设计(图 2),以及时探测接地及绝缘故障,最大程度保护系统不受损害<sup>[3,4]</sup>;而内、外绝缘层之间的接地金属内屏蔽层可有效控制涡流的影响,降低低温部件的热散逸;外屏蔽除了对 Busbar 提供机械保护外,同时也是 Busbar 的放电通道。考虑到当磁体失超切断电源后,超导磁体线圈的电流是通过 Busbar(失超时电流将转移到 Busbar 铜基体中

流动)转移到外部并联电阻,经外部并联电阻释放能量、控制磁体温升和端电压的,因此,与磁体线圈超导体相比, Busbar 超导材料采用更高的铜超比,以确保线圈有效卸荷。为防止 Busbar 短路时产生的电弧击穿杜瓦内部部件, Busbar 外部还设计有金属隔离管(内保护管),通过隔离管将 Busbar 与杜瓦内部部件相隔离。

#### 1.2 低温补偿设计

馈线内超导电流传输线、冷却管等一端连接线圈,可随线圈移动,另一端与 S 弯盒连接,不可动。如果不采用补偿结构设计,当由常温(300 K)降至工作温度(4 K)时,因线圈位移以及本身的热收缩造成的应力将高达 1 000 MPa 以上,已远高于 Busbar 的许用应力。为降低应力,需设计柔性部分吸收相对位移。对于冷却管,在 S 弯盒内设计有金属软管,通过金属软管的柔性来吸收相对位移、降低热应力。对于 Busbar,则将其设计成双 S 形弯曲,利用双 S 形弯曲的柔性来吸收相对位移并进行温度补偿。

#### 1.3 电磁平衡结构设计

在磁场作用下, Busbar 的电磁力可高达  $10^4$  N/m 量级。为减少电磁力的影响, Busbar 以正负成对的方式设计,正负 Busbar 通过支承固定在两 Busbar 之间的不锈钢隔板上(图 2), Busbar 之间的电磁力可以内力形式最大程度抵消。支承的分布与磁感应强度相适应,在磁感应强度大的区域,因电磁力较大,支承密布;

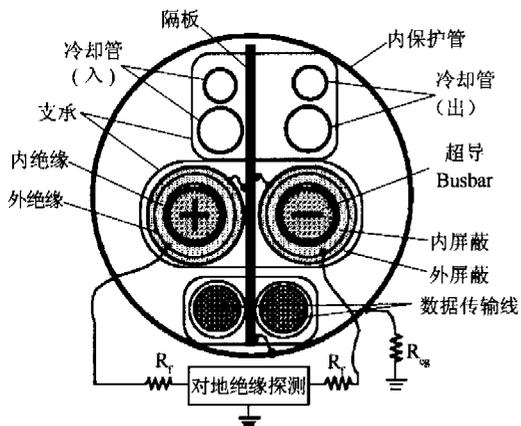


图 2 馈线的双重绝缘设计

Fig. 2 Double-insulation in feeder

在远离磁体的区域,因磁感应强度降低,电磁力相对较小,支承则布置得相应稀疏些。

## 2 ITER 过渡馈线有限元分析

为验证设计结构的合理性,同时也为了进一步优化设计结构,借用大型有限元分析软件 ANSYS 对过渡馈线关键结构进行分析,了解其应力大小及分布状况,为最终确定结构提供理论依据。

### 2.1 S 弯盒有限元分析

S 弯盒用于陈放过渡馈线低温补偿部分,外部为室温,内部为 4 K 低温。为减少热应力、提高热效率,S 弯盒内设置有 80 K 的冷屏,冷却介质采用冷氦气,同时对冷屏表面镀银以减小热辐射系数。S 弯盒外壳体设计壁厚 20 mm,为增加本体强度,侧壁设计了加强筋。S 弯盒承受载荷较复杂,包括本体自重、冷屏重量、各类管线重量、内外压差(0.1 MPa)以及温度载荷等。在失超等情况下,S 弯盒上会感应产生涡流和分布不均匀的电动力以及一定的热载荷,这些均带来一定的机械应力和热负荷冲击,因此,结构设计时必须加以考虑。根据 S 弯盒的特点,在对其结构进行一定简化后进行实体建模,并将可能产生的载荷皆组合加载到相关面上。材料参数取:弹性模量  $E=195$  GPa,泊松比  $\nu=0.3$ ,密度  $\rho=7900$  kg/m<sup>3</sup>。最终分析结果如图 3 所示。最大冯·米赛斯应力为 136.953 MPa,最大位移为 1.713 mm。应力值小于基体材料的许用应力(常温下约为 200 MPa),因此,设计结构满足强度要求。

### 2.2 超导 Busbar 有限元分析

过渡馈线中的 Busbar 用多根超导复合股

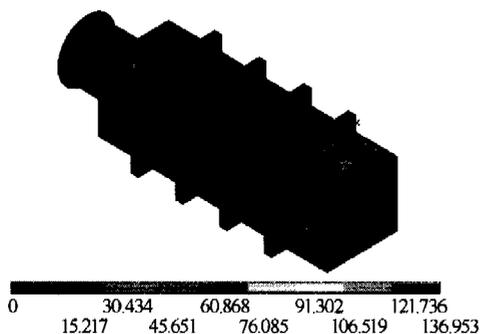


图 3 S 弯盒分析结果

Fig. 3 Analysis of S-bend box

线经多级绞缆成形,最后封装于不锈钢导管中的 CICC (Cable in Conduit Conductor) 型超导体,其外侧面设有 1 个厚的不锈钢导管(材料 316LN)作为电磁力的支撑和传递构件。为增强冷却能力及减少流体流量压降,Busbar 设置了中心冷却管,采用超临界氦迫流内冷。Busbar 承受的载荷主要包括本体自重、温度载荷、Busbar 端面的附加位移、电磁载荷等,其中,温度载荷(4~300 K)以及电磁载荷影响最大。为降低应力,Busbar 采用双 S 形结构设计,利用双 S 形的柔性来吸收因热、电磁、地震等因素造成的附加位移,而电磁力的平衡则通过所设计的电磁平衡结构实现。Busbar 的等效材料参数取:弹性模量  $E=53$  GPa,泊松比  $\nu=0.3$ ,密度  $\rho=6.6 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>,热收缩率为  $-0.31\%$ (4~300 K)。图 4 为极向场 Busbar 热分析结果。从图 4 可看出,采用双 S 弯补偿结构,Busbar 综合变形虽较大(91.79 mm),但所产生的应力并不很大,为 124.653 MPa,远低于超导电流传输线的许用应力(常温下约为 250 MPa)。图 5 为极向场 Busbar 热、电磁分析结果。从图 5 不难看出,由于采用了电磁平衡结构,电磁力对 Busbar 整体应力及整体变形影响不是很大,只是在 Busbar 的支撑处,因支承的影响,应力发生波动。因此,设计的双 S 弯补偿结构、电磁平衡结构达到了预期目的。

### 2.3 内保护管有限元分析

内保护管一端通过焊接与磁体线圈终端相连,另一端一直延伸到 S 弯盒内,可自由伸缩。内保护管承受的载荷主要包括本体自重、温度载荷、端面的附加位移以及一定的电磁载荷等。因最终所有电弧将转移到内保护管,并通过内保护管经由杜瓦壁引入地下,因此,内保护管在设计上更多考虑的是其放电通道的特点,即要

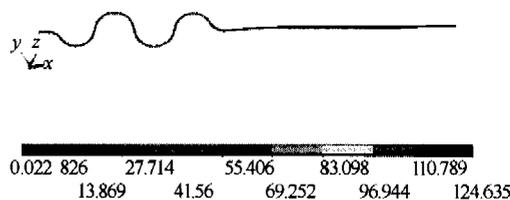


图 4 Busbar 的热分析结果

Fig. 4 Thermal analysis of Busbar

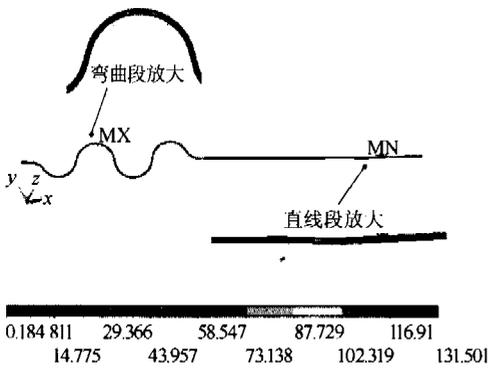


图5 Busbar的热、电磁分析结果

Fig. 5 Thermal and magnetic analysis of Busbar

求卸荷时内保护管不会因电弧而熔化。作为卸荷通道的内保护管,设计壁厚 10 mm,截面面积约为 0.02 m<sup>2</sup>,在 70 kA 的电弧作用下约需 500 s 才能熔化(绝热温升为 2.5 K/s),以确保有充分时间卸荷。因为内保护管承受载荷并不是很大,因此,计算的应力值较小,一般不超过 40 MPa。图 6 为极向场馈线其中之一的内保护管应力分布情况。

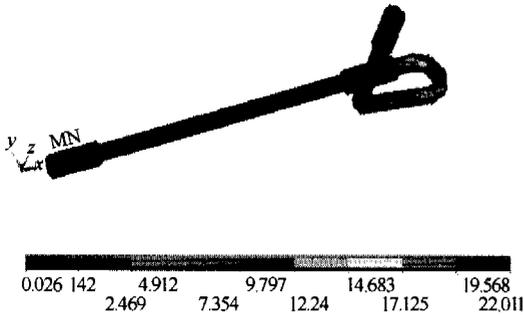


图6 内保护管的分析结果

Fig. 6 Analysis of feeder duct

### 3 结束语

ITER 过渡馈线结构复杂,它涉及到机械、低温、真空、电物理以及力学等多门学科。对于这样大型复杂的工程装置,在设计时,借助有限元分析软件 ANSYS 对过渡馈线关键部件进行模拟和分析,并以分析结果作为设计时的参考依据,以不断优化设计,使之更加合理,为结构的最终确定提供可靠的理论依据。

### 参考文献:

- [1] AYMAR R. Status of ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2002, (61-62):5-12.
- [2] OKUNO K, BESSETTE D, FERRARI M, et al. Key features of the ITER-FEAT magnet system [J]. Fusion Engineering and Design, 2001, (58-59):153-157.
- [3] YOSHIDA K, LIDA F, GALLIX R, et al. Electrical insulation design and monitoring of the ITER magnet system[C]// Proceedings of the 20th Symposium on Fusion Technology. Marseille, France:ELSEVIER,1998: 807-810.
- [4] YOSHIDA K, IIDA F, GALLIX R, et al. Protection measures for selected ITER magnet system off-normal conditions[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, (41):247-252.