

国际热核聚变反应堆馈线系统线圈终端盒冷屏热性能分析及实验研究

刘素梅^{* 1,2} 宋云涛¹ 武松涛¹ 王忠伟¹

(11 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031; 21 安徽农业大学工学院 合肥 230036)

Thermal Shielding of Coil Terminal Box Used in International Thermonuclear Experimental Reactor Feeder

Liu Sumei^{* 1,2}, Song Yuntao¹, Wu Songtao¹, Wang Zhongwei¹

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;

2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract We addressed the thermal shielding of the coil terminal box (CTB) - one of the key components of the feeder of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Covered with an internal 80K thermal radiation shield, the CTB provides the 41.5K environment and houses the interconnection of the magnet systems with the Cryoplant, the power supplies, the data acquisition system and the local cryogenic components. After the thermal shielding characteristics of the CTB were theoretically analyzed, its possible structure was modeled, with a 0.18MPa nitrogen gas inlet as the boundary condition, and simulated in finite element method (FEM) with the commercial software package FLUENT. Based on the simulated results, the full-sized prototype CTB was designed, constructed and experimentally tested. We found that the experimental results, under the steady state of the CTB thermal shielding, agree extremely well with the simulated results.

Keywords Thermal shield, Heat radiation, Numerical simulation, ITER

摘要 线圈终端盒是保证国际热核聚变实验堆装置可靠运行的关键部件之一,为磁体系统与低温车间、电源大厅、数据采集系统和低温控制元件提供 41.5K 的超低温工作环境。线圈终端盒内设有 80K 冷屏,以吸收室温环境对其内部工作空间带来的辐射热负荷。本文首先根据传热学原理对线圈终端盒冷屏热性能进行理论分析,确定了冷屏的结构型式,然后再对线圈终端盒冷屏结构建模,利用有限元流固耦合分析软件 FLUENT 进行了数值模拟仿真分析,最后以设计分析结果为依据制作 1B1 线圈终端盒整体实验系统进行实验验证,并对实验数据和数值模拟结果进行了分析比较,结果非常吻合,为下一轮冷屏结构的设计及大规模生产提供了可靠的依据。

关键词 冷屏 热辐射 数值模拟 ITER

中图分类号: TL62+ 6 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2010.01.06

国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor ITER)计划目标是要建造一个可自持燃烧的全超导托克马克核聚变实验堆,以便对未来聚变示范堆和商用聚变堆的物理问题和工程问题作深入的探索。参加 ITER 计划,是中国为国家未来能源可持续发展而作出的重大决策,充分彰显了中国对全球重大发展问题负责任的态度和积极参与国际科技合作、充分利用国际科技资源促进自主创

新的雄心和决心。而全面推动 ITER 采购包预研任务的执行,为采购包制造任务按期、保质、保量的完成奠定坚实基础,是我国目前主要工作之一。

线圈终端盒 CTB(Coil Terminal Box)是 ITER 装置中超导馈线系统(Feeder)的重要组成部分,位于杜瓦和生物屏蔽层的外侧附近,连接在过渡馈线 S 弯盒的外侧,为馈线系统中的管、缆、线分别与低温车间、电源大厅以及数据收集系统的相联接提供接

收稿日期: 2009-12-13

基金项目: 国家 973 项目/ITER 高温超导超大电流引线型超导传输线的研究(No. 2008CB717906); ITER 计划专项支持(项目名称: ITER 大型超导磁体系统馈线研究(No. 2008GB102000))

* 联系人: Tel: (0551) 5593267; E-mail: liusm1117@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

口和屏蔽保护。CTB 盒的结构如图 1 所示, 箱体外形尺寸为: 3380mm @1260mm @1260mm(长 @宽 @高), 箱体外部为 300K 的室温外杜瓦, 材料采用 40mm 厚的 304L 不锈钢, 内部设置 3mm 厚的 3003 铝合金冷屏, 冷屏上的工作温度为 80K, 冷屏内外均为真空, 其内部的工作区域为 415K 的低温环境, 杜瓦内外压差 0.11MPa^[1]。在杜瓦和冷屏中间, 设置 30mm 的真空多层绝热夹层。

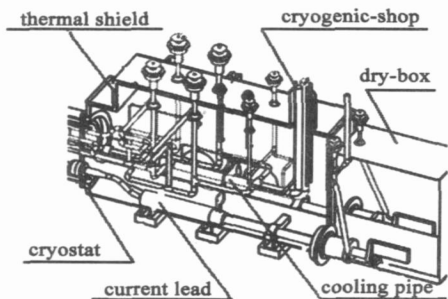


图 1 CTB 盒结构剖视图

Fig 1 Structure of the CTB

CTB 冷屏及其内部电流引线不失冷、失超是保证 ITER 装置可靠运行的关键。按照国际组 ITER 设计技术要求, CTB 盒及其内部所有部件都必须分别制作实验件并制作组装完整原型件, 反复进行多次试验预研, 确保各项技术指标达到性能要求^[1], 方可进行下一步的工作。本文系统地理论上对 CTB 实验件冷屏进行设计分析讨论, 并利用 FLUENT 软件进行数值模拟分析, 然后通过实验对比验证理论分析结果的正确性。

1 理论分析与数值模拟

1.1 冷屏材料选择和结构形式

目前国内外在低温系统中使用的冷屏材料主要是不锈钢、紫铜和铝合金^[2]。由于 CTB 冷屏体积大, 对温度分布要求高(氦气质量流不大的前提下, 冷屏各部位与氦气之间的温度梯度不能大于 10K)^[1], 不锈钢材料低温热导率低, 不能满足冷屏温度分布设计要求; 紫铜虽然热导率高, 但其定压比热容几乎是 3003 铝合金的一半, 因此其低温热性能与铝合金相比并无明显优势, 且重量是 3003 铝合金的 3 倍还多。所以选用 3003 铝合金作为冷屏材料不仅重量轻, 而且其热性能能够满足国际组的设计要求。

CTB 冷屏采用 304L 不锈钢作为内骨架, 3mm 厚

3003 铝合金薄板作为吸热板, 吸热板内表面装有相互平行的外方(22mm @22mm)内圆(<18mm)同材质铝合金管, 铝合金管内通 80K 氮气(CTB 实验件通氮气, 工作原型件通氦气)以吸收各种热负荷, 冷屏内外均为真空环境, 这层铝合金板既能作为吸热板, 又能使绝热层与内部的工作环境隔开, 同时又能起到反射屏的作用。

1.2 冷屏热性能的理论分析

对于 CTB 冷屏这类问题, 由于在管线轴向上管板的长度远大于其厚度, 可以简化成管道))) 肋片式辐射器进行分析, 其特点是沿辐射器宽度方向温度不是均匀分布的, 可以按照矩形截面肋片进行分析计算^[3](如图 2 所示)。

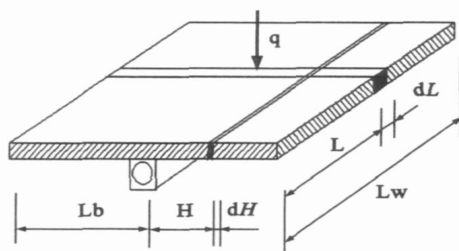


图 2 管道-肋片式辐射器

Fig 2 Radiator of pipe+rib

显然, 稳定状态下, 肋片吸收的热量均要通过肋根的冷源带走。因此从微元长度 dH 的侧面上辐射进来的热量, 应等于通过 H 和 $H + dH$ 断面上的导热之差, 即:

$$q - ER^4 = -kD \frac{dT}{dH} \quad (1)$$

式中, q 为从 CTB 盒外面进来并透过多层绝热层到达冷屏的热流, E 为肋片的表面法向发射率, R 为玻尔兹曼常数, T 为肋片表面温度, k 为肋片材料的导热系数, D 为肋片的厚度, H 为冷却管道间距。

解出这个微分方程, 即可得到沿肋片长度 H 的温度分布; 而其边界条件 T_w (肋根部温度) 则可由以下方式求得。为简化计算, 假定吸热板的温度分布是关于管轴线对称的, 且流体管道壁在同一截面上沿周向温度一致。现于沿管道某长度 L 处取一微元段 dL , 由此段上两个对称面吸收辐射的热量为:

$$dQ_r = (q - ER_w^4) 2G_L dL \quad (2)$$

式中, G 为肋效率, L_h 为肋宽度, T_w 为肋根部温度 (即管壁温度)。

同时,流体的热量是以对流的方式与导管壁面热量交换的,因此有:

$$dQ = Sh_f(T_w - T_f)dL \quad (3)$$

式中, S 为导管通道截面的周长; h_f 为对流换热系数, T_w 和 T_f 分别是管壁与流体的温度。

在稳定情况下, $dQ_r = dQ_f$, 即:

$$Sh_f(T_w - T_f) = (q - HR_w^4)2G_h \quad (4)$$

工质流体通过管道时在同一微元段上所吸收的热量为:

$$dQ_r = q_m c_p dT_f \quad (5)$$

而工质流体从管道吸收的热量为:

$$Q_r = q_m c_p (T_{f1} - T_{f2}) \quad (6)$$

式中, q_m , c_p 分别为工质流体的质量流率和比热, T_{f1} 和 T_{f2} 为流体的进、出口温度。

采用管内强制对流换热^[4]公式,再由式(4)、(6)即可求得流体进出口管壁温度 T_{w1} 和 T_{w2} 。则沿肋片长度 H 方向的进出口处冷屏面板温度分布如图3所示(冷屏结构尺寸及材料物性参数见表2)。

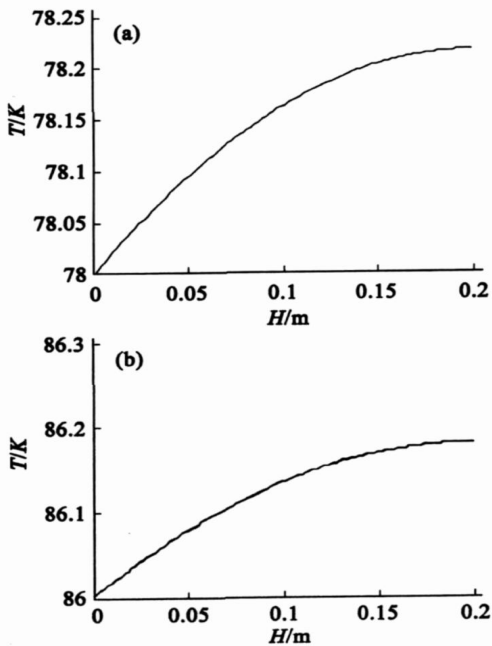


图3 (a)冷屏上氮气进口处温度分布,(b)冷屏上氮气出口处温度分布

Fig 3 (a) Temperature distribution of the inlet of nitrogen on CTB panel (b) Temperature distribution of the outlet of nitrogen on CTB panel

113 冷屏热性能的数值模拟

根据理论分析 CTB 箱体真空度保持在 10^{-3} Pa

$\sim 10^{-4}$ Pa 时,透过真空多层绝热夹层由外杜瓦到达冷屏表面的热流为 $4\text{W}/\text{m}^2$ ^[5],工质流体氮气在 0.1 MPa 压力下(物性参数见表 1),稳定状态时按照前面的分析结果将流速控制在 $25\text{m}/\text{s}$ ⁻¹(即质量流为 $0.10278\text{kg}/\text{s}$ ⁻¹),温度约为 78K。把以上结果作为边界条件,代入 FLUENT 进行数值模拟^[6]分析。由于 CTB 冷屏(其结构尺寸及材料物性参数见表 2)的 6 块面板冷却管道是串联连接的,因此按照进气路线的顺序,冷屏的第一块面板氮气进口温度为 78K,接下来后一块面板的氮气进口温度等于前一块面板的氮气出口温度,分析后各面板温度分布云图见图 4 所示。

表 1 氮气在 0.1 MPa 压力下的物性参数

Tab. 1 Characteristics of nitrogen at 0.1 MPa pressure

温度/ K	密度/ kg/m^3	定压比热容/ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$	黏度/ $@10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	热导率/ $@10^{-3}\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$	普朗 特数
80	4.37958	1.19127	5.4604	7.81310	0.8325
90	3.84494	1.08067	6.1347	8.72975	0.7594

表 2 冷屏结构尺寸及材料物性参数

Tab. 2 Sizes and characteristics of the CTB thermal shield material

温度 /K	冷屏厚 度/mm	冷却管间 距/mm	冷却管结构 尺寸/mm	冷屏材料热导率 / $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$	冷屏材料 密度/ kg/m^3
80	3	400	外方 20@20 ;内圆 U18	90	2710

2 实验

为了验证各项技术性能指标能否达到理论分析值,制作了 1B1 尺寸的 CTB 箱体、冷屏及其内部电流引线等所有部件,并组装成完整实验件进行了第一轮实验。整体实验系统包括实验件本身、电源系统、冷却系统、真空系统以及性能测试系统组成(图 5 为系统安装完毕后的照片)。其中 CTB 冷屏性能测试包括温度测试和应力应变测试,本文只讨论其真空环境的热性能。

CTB 冷屏制作完成后按照其热性能理论分析结果,选取如图 4 所示的有代表性位置 1~10 点布置 Pt1000 低温温度传感器共 10 个,在冷屏氮气进出口处分别安装压力传感器和温度传感器各一个,在进口处安装流量计一个。以上所有传感器与测试电流引线性能的传感器等,一起与测试平台相接组成测试系统。

整体实验系统所有部分都安装调试完成后,首先

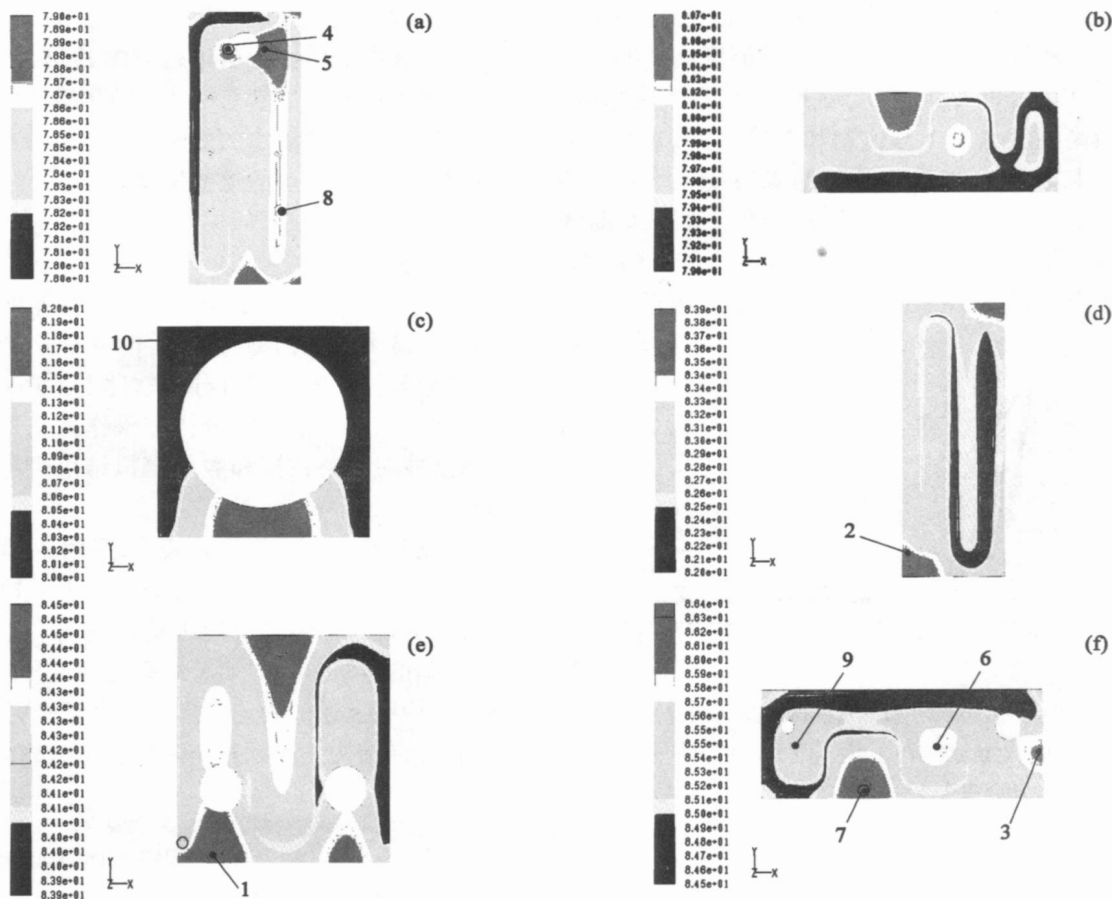


图 4 (a) CTB 冷屏顶板温度分布云图; (b) CTB 冷屏左侧板温度分布云图; (c) CTB 冷屏前侧板温度分布云图; (d) CTB 冷屏底板温度分布云图 (e) CTB 冷屏后侧温度分布云图; (f) CTB 冷屏右侧温度分布云图

Fig 4 (a) Temperature distribution on the top of the CTB thermal shield; (b) Temperature distribution on the left side of the CTB thermal shield; (c) Temperature distribution on the front side of the CTB thermal shield; (d) Temperature distribution on the bottom of the CTB thermal shield; (e) Temperature distribution on the back side of the CTB thermal shield; (f) Temperature distribution on the right side of the CTB thermal shield

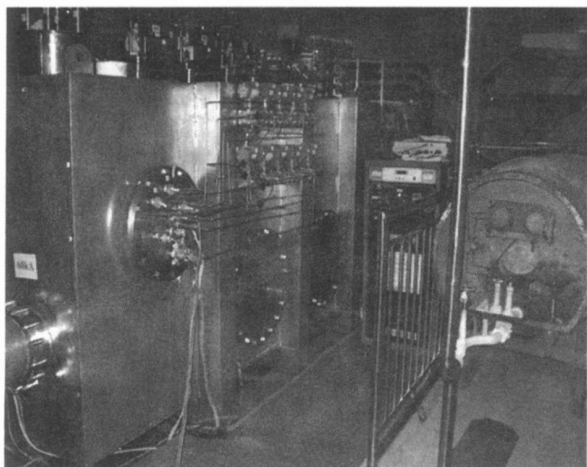


图 5 CTB 实验件整体系统

Fig5 System of the test CTB

开启真空系统,待 CTB 盒体内真空度稳定在 10^{-4} Pa 左右时(三天后),开启氦制冷系统给电流引线降温。当电流引线的温度降至 100K 后(大约两天)开始给 CTB 冷屏通氮气降温,整个过程全部由测试系统实时跟踪监测。从 CTB 冷屏通氮气降温到停止供氮气、氦气后,CTB 实验件整体回到室温状态共持续了 7 天时间。

3 结果与讨论^[7]

3.1 实验结果

图 6 显示了 CTB 冷屏通氮气后温度随时间的变化情况,图中各数字与图 3 中相应位置点数字相同。该图为 CTB 冷屏从通氮气降温到平衡稳定状

态后的前 15h 各采集点温度实时变化情况,从图中可以清楚地看出,降温 3h 后冷屏的温度就全部降到了 100K 以下, 8h 后其温度就达到了设计性指标。其中最高温度点为 1 号位置和 7 号位置, 温度分别为 88K 和 87.7K, 与数值分析结果(1 号为 84.15K, 7 号为 86.14K) 接近, 与理论分析结果(最高温度为 86.185K, 最低温度为 78.1215K) 也是比较接近的。其他各点位置温度值也与数值分析结果相近。

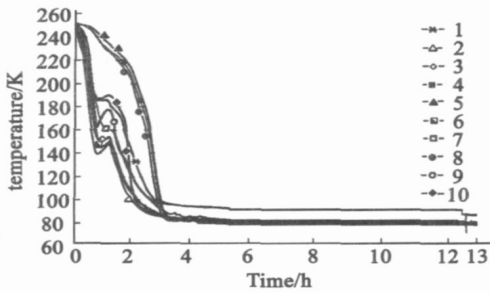


图 6 CTB冷屏通氮气后温度变化曲线

Fig 6 Temperature change of the CTB thermal shield after nitrogen gas imported

3.1.2 讨论

由于 CTB 冷屏内部电流引线及其它部件已经提前降温至 100K 以下, 且要继续降温至 41.5K, CTB 冷屏的温度下降很快。但由于通氮气后不到 1h 时, 通气管道密封破损漏气, 经维修后恢复正常, 因此这个时段温度曲线有波折, 但随后的整个实验过程一切正常。尽管数值分析结果显示 7 号位置点的温度最高, 而理论分析也应该是 7 号点温度最高。但由于电流引线的温度从前至后是从 41.5K 逐渐过渡到 65K 的, 对其周围冷屏势必造成一定的影响, 因此使得处在电流引线高温段外围的 1 号位置点温度提高, 超过了最高点 7 号位置点。而其它各位置点的温度与数值分析结果基本接近。

由以上实验测试结果可见, 采用本文叙述的理论分析和数值模拟方法进行 CTB 冷屏的设计分析, 结果是可信的。尽管有一些影响因素无法预计(如其内部部件温度对它的影响), 但这种分析模拟结果可以作为实际设计的重要依据。

4 结论

本文首先通过对 CTB 冷屏热性能的理论分析确定了冷屏的结构型式, 然后再对冷屏结构建模, 利用有限元流体固体耦合分析软件 FLUENT 进行数值模拟仿真分析, 最后将分析结果作为依据进行实验验证, 并对实验数据和数值模拟结果进行了分析比较。

实验和理论模拟结果表明, 采用 3003 铝合金作为冷屏材料, 且选用外方内圆结构型式冷却管是可行的, 为设计低温系统冷屏选择材料和结构型式提供了新的方法。同时实验结果与理论分析结果非常吻合, 说明上述的理论计算方法是正确可信的, 为下一轮冷屏结构的设计及实验提供了可靠的依据。

参 考 文 献

- [1] Engineering Description. ITER Design Description Document 11 Magnet [R], 2004
- [2] Sahu A K, Sarkar B, Gupta N C, et al. Effect of thermal contact between winding pack and casing on thermal behavior of SSF-1 TF coil [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 2521- 2525
- [3] 闵桂荣, 郭舜. 航天器的热控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 330- 340
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 229- 256.
- [5] 刘素梅, 宋云涛, 武松涛等. ITER 装置 CTB 盒冷屏绝热结构初步设计与分析 [J]. 低温与超导, 2008, 36(3): 8- 10.
- [6] 王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 165- 226
- [7] 杨丰帆, 方亮, 孙建生, 等. 直流反应磁控溅射法制备 $CdIn_2O_4$ 薄膜的光电性能研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(6): 460- 466.