

ITER 馈线系统 CTB 盒冷屏多层绝热结构 传热性能的实验研究

刘素梅^{1,2}, 宋云涛², 武松涛², 王忠伟²

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036 2 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 线圈终端盒 (CTB) 是保证 ITER 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 4.5K 的超低温工作环境。线圈终端盒 (CTB) 内部设有 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, 在杜瓦和冷屏中间, 设有 30mm 的真空多层绝热夹层。首先采用量热法和称重法, 对多层绝热试件进行了热性能测试, 然后分别与理论分析和 CTB 原型件系统实验结果进行对比, 得出了 CTB 盒中多层绝热结构的热性能参数, 为下一步大规模生产提供了有力的技术支持。

关键词: 多层绝热; 传热性能; CTB 盒; 国际热核聚变实验堆

The experiment research of multilayer- insulation heat transfer on coil terminal box thermal shield of ITER feeder

Liu Sumei^{1,2}, Song Yuntao², Wu Songtao², Wang Zhongwei²

(1. School of Engineering Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

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

Abstract The Coil Terminal Boxes (CTB) as one of the key components of Feeder of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) provided the 4.5K housing for interconnection of the magnet systems with the cryoplant, the power supplies and the data acquisition system. An internal 80K thermal radiation shield covered all surfaces of the CTB, which could be used to obstruct the radiation heat loads from CTB boxes in room temperature. The multi-layer insulation of 30mm thickness was laid between Dewar and the shield. In this paper first the heat parameters of multilayer-insulation were tested by two methods. Then results were compared with the results of analysis and CTB prototype testing. The heat parameters of multilayer-insulation under the steady state operation of CTB thermal shield cooling system were obtained, which is useful to improve the finally design and mass production of CTB thermal shield.

Keywords Multilayer-insulation; Heat parameter; Coil Terminal Box; ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

1 引言

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做出的重大决策, 充分彰显了中国对全球重大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、保量完成奠定坚实基础是我们目前主要工作之一。

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、电源大厅以及数据采集系统相联接提供接口和屏蔽保护。CTB 盒的结构如图 1 所

收稿日期: 2010-01-18

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”(2008CB717906); ITER 计划专项 (“中国承担 ITER 计划任务相关科学问题和关键技术的研究”2008GB102000)项目资助。

作者简介: 刘素梅 (1967-), 女, 教师, 博士, 研究方向为装置的结构分析及低温传热分析。

示, 箱体外形尺寸为: 3 380 × 1 260 × 1 260mm (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 4 5K 的低温环境, 杜瓦内外压差为 0.1MPa^[1]。在杜瓦和冷屏中间, 设置 30mm 的真空多层绝热夹层。

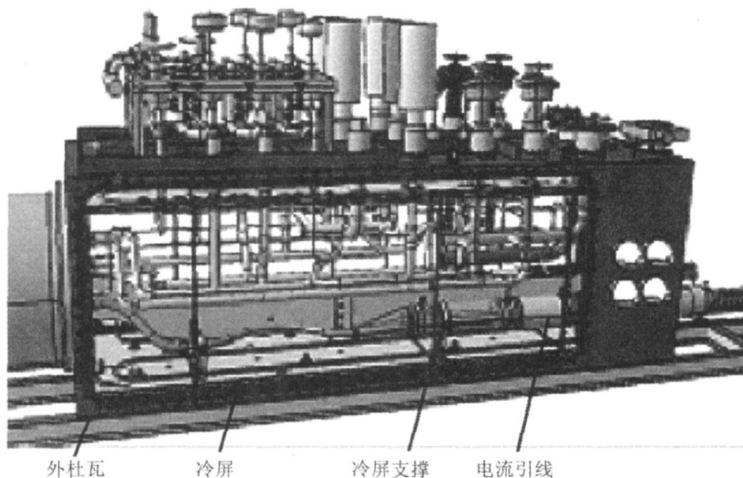


图 1 CTB 盒结构剖视图

Fig. 1 Structure of CTB

CTB 冷屏及其内部电流引线不失冷、不失超是保证 ITER 装置可靠运行的关键。按照 ITER 国际项目组设计技术要求, 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。本文通过对 CTB 冷屏多层绝热结构进行实验研究, 并与理论分析结果对比, 然后再与 CTB 原型件整体实验中的冷屏实验结果进行对比, 从而得出 CTB 冷屏多层绝热结构的热性能参数, 为 ITER 馈线系统下一轮冷屏结构的设计及大规模生产提供了可靠的依据。

界向容器内的漏热量。根据漏热量和测量筒的外表面尺寸, 可计算出多层绝热材料的平均比热流。

2 实验方法和步骤

2.1 实验原理及系统

2.1.1 量热法

实验连接基本结构如图 2 所示, 主体为真空绝热双层容器, 内容器由三段组成, 上下两段为保护筒, 中间为测量筒, 外部包裹多层绝热材料。夹层抽真空后, 分别在保护筒和测量筒中加注液氮, 静置稳定后, 利用流量计测量液氮的蒸发量。根据测量筒内液氮的蒸发量, 来计算一定时间内外

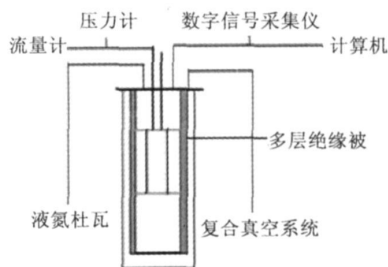


图 2 实验连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of evaporation test

该量热器测量筒 (见图 3) 长度为 L , 外径为 d 。由于保护筒的作用, 测量筒上下端面的传热可以忽略不计, 热量仅通过圆筒周向传入, 其传热表面积为 A 。多层绝热材料的比热流 q 可用下式计算^[2]: $q = \frac{Q}{A} = \frac{r \cdot m}{A}$ (1) 式中: q : 绝热被的比热流, W/m^2 ; Q : 量热器总漏热量, W ; m : 标准状态下测量筒氮气质量流量, kg/s ; r : 77K 时液氮的气化潜热, $r = 199 kJ/kg$

根据比热流 q 可以计算出绝热被的表观热导

$$\text{率: } q = K \cdot \frac{T_2 - T_1}{\delta} \quad (2)$$

式中: K : 表观热导率, $W/m \cdot K$; δ 绝热材料厚度, m ; T_1 : 冷边界温度, K ; T_2 : 热边界温度, K ;

2.1.2 称重法



图 3 量热法外杜瓦装置

Fig 3 Cryostat of evaporation test

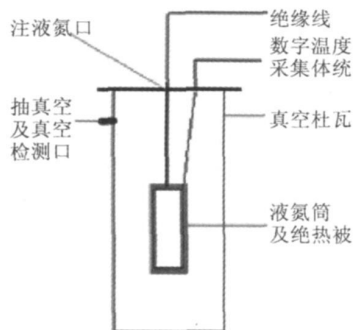


图 4 称重法实验结构图

Fig 4 Schematic diagram of weight test

考虑到实验中液氮的蒸发量相对较小, 因此流量计产生的误差值会大于 $\pm 1\%$ 。为了能够更加准确地掌握实验结果, 又采用了传统的称重法(结构原理见图 4)再次对所选用的绝热试件进行实验(见图 5), 以期通过对比得出相对准确的实验结果。

2.2 实验样件及实验方法

按照现有生产条件制作不同的多层绝热实验块, 分别对其进行测试, 且与理论分析结果比较, 并结合 CTB 原型件实验测试情况进行分析比较, 来研究绝热结构的热性能。

制作多层绝热被试块五个(选择其层密度均为 30 层/厘米), 其中双面镀铝涤纶薄膜作为反射屏, 玻璃纤维布作为间隔物的试块 3 个, 分别为 30 层、40 层、50 层各一块; 双面镀铝涤纶薄膜作为反射屏, 填碳纸作为间隔物的试块两个, 为 30 层、40 层。我们设计制作了一套测试杜瓦, 配备相应的一系列真空、制冷机组及测试仪器, 确保了杜瓦中间的真空空间距离为 30~50 mm(与 CTB 盒外杜瓦和冷屏之间的距离相同)。



图 5 称重法实验液氮筒及绝热被

Fig 5 Cryostat of weight test

在此值得说明的是, 尽管多层绝热结构经过烘烤会提高其层间真空度^[3], 从而可以降低其表观导热系数, 但是由于 CTB 箱体结构体积较大,

内部管路较多,且电流引线位于其中,使得对其多层绝热结构加热烘烤十分不便。因此,为了与 CTB 冷屏多层绝热结构真实运行工况一致,本实验也不对多层绝热进行加热烘烤,实验时只将其层间表观真空度控制在 10^{-3} Pa~ 10^{-5} Pa 即可。

3 实验结果及分析

表 1 双面镀铝涤纶薄膜 + 玻璃纤维纸实验测得值及当量热导率 (一)

Tab 1 Testing results and equivalent conductivity with double-aluminum multilayer plus fibre glass (1)

层数	外径 (mm)	内壁温度 (K)	外壁温度 (K)	蒸发 5 升液氮所需时间 (s)	起始时刻真空度 (Pa)	终了时刻真空度 (Pa)	表观热导率 (W/m·K)
50	341	76.2	286.7	5590	1.2×10^{-4}	2.2×10^{-1}	1.72×10^{-4}
40	335	76.2	285.1	4650	5.7×10^{-5}	1.1×10^{-2}	1.61×10^{-4}
30	328	76.2	284.3	4990	4.2×10^{-5}	4.6×10^{-2}	1.41×10^{-4}

(2) 第二组试验双面镀铝涤纶薄膜 + 填碳纸 40 层、30 层

一致,先测 40 层厚的,然后去掉 10 层再测 30 层的。其结果如表 2 所示。

表 2 双面镀铝涤纶薄膜 + 填碳纸实验测得值及当量热导率 (一)

Tab 2 Testing results and equivalent conductivity with double-aluminum multilayer plus carbon paper (1)

层数	外径 (mm)	内壁温度 (K)	外壁温度 (K)	蒸发 5 升液氮所需时间 (s)	起始时刻真空度 (Pa)	终了时刻真空度 (Pa)	表观热导率 (W/m·K)
40	335	76.4	284.4	5720	4.5×10^{-5}	2.4×10^{-3}	5.38×10^{-5}
30	328	76.3	283.8	5590	2.6×10^{-5}	1.9×10^{-3}	5.06×10^{-5}

3.1.2 称重法实验测试结果

(1) 第一组试验,双面镀铝涤纶薄膜 + 玻璃纤维纸 50 层、40 层、30 层:

表 3 双面镀铝涤纶薄膜 + 玻璃纤维纸实验测得值及当量热导率 (二)

Tab 3 Testing results and equivalent conductivity with double-aluminum multilayer plus fibre glass (2)

层数	外径 (mm)	内壁温度 (K)	外壁温度 (K)	静置 24 小时液氮蒸发量 (kg)	起始时刻真空度 (Pa)	终了时刻真空度 (Pa)	表观热导率 (W/m·K)
50	193	76.3	281.8	1.5	1.2×10^{-4}	2.7×10^{-1}	1.157×10^{-3}
40	187	76.4	280.4	1.6	5.7×10^{-5}	1.5×10^{-1}	9.963×10^{-4}
30	180	76.9	284.6	1.7	4.2×10^{-5}	8.6×10^{-2}	7.817×10^{-4}

(2) 第二组试验双面镀铝涤纶薄膜 + 填碳纸 40 层、30 层:

表 4 双面镀铝涤纶薄膜 + 填碳纸实验测得值及当量热导率 (二)

Tab 4 Testing results and equivalent conductivity with double-aluminum multilayer plus carbon paper (2)

层数	外径 (mm)	内壁温度 (K)	外壁温度 (K)	静置 24 小时液氮蒸发量 (kg)	起始时刻真空度 (Pa)	终了时刻真空度 (Pa)	表观热导率 (W/m·K)
40	187	76.6	282.6	1.5	4.5×10^{-4}	2.6×10^{-2}	9.24×10^{-4}
30	180	77.1	284.3	1.6	2.6×10^{-4}	1.8×10^{-2}	7.375×10^{-4}

3.2 理论分析结果

CTB 装置由外杜瓦到冷屏的热量传递非常复杂,在多层绝热中最有影响的热流有:屏与屏之间及屏与间隔物之间的辐射传热 q_1 、间隔物与屏之

间及间隔物中的固体传热 q_2 以及多层中残余气体的热传导 q_3 。由于多层绝热层间传热性能受到材料、工艺及横向传热等各方面的影响^[4],经分析计算,按照绝热层层内最大真空度为 1Pa 双

面镀铝涤纶薄膜发射率为 0.1 计算, 则绝热层的表观热导率为^[5]:

$$K = K_1 + \bar{\lambda}_s + \bar{\lambda}_g \quad (3)$$

其中: $K_1 = 1.0932 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是其辐射热流和辐射传热的表观传热系数; $\bar{\lambda}_s = 1.239 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是其固体传热的平均热导率; $\bar{\lambda}_g = 2.152 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 是其层间气体导热的平均导热系数。

3.3 CTB原型件实验结果对比

按照 ITER 国际项目组的要求, 线圈终端盒 (CTB) 及其内部高温电流引线 (HTS) 必须首先研制出原型件, 并对原型件的各项技术指标反复进行测试, 确保其技术性能完全满足国际项目组要求, 方可进行下一步的研制工作。本实验就是根据设计分析模拟结果, 制作了如图 6 所示的 1:1 原型件 (包括 CTB 箱体、冷屏、多层绝热结构以及高温电流引线), 对原型件按照实际工况条件进行运转实验 (见图 7), 并实时跟踪测试实验运行中的各项性能参数, 以期达到设计要求。

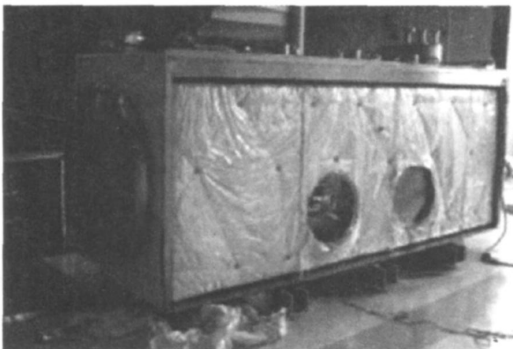


图 6 包有多层绝热的冷屏装在 CTB 盒体内

Fig 6 Thermal shield with multilayer-insulation inside CTB box

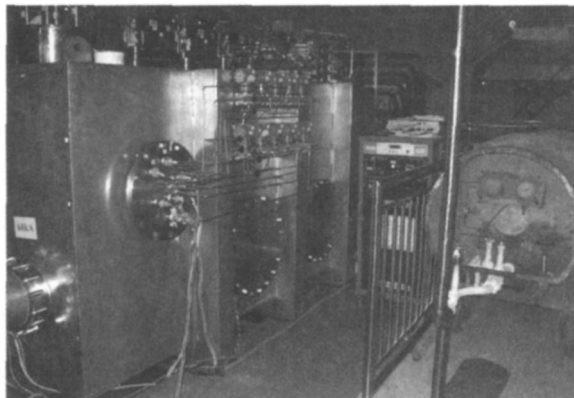


图 7 实验中的 CTB 实验件整体系统

Fig 7 The whole CTB testing system

其内部实验件 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 (22 × 22mm) 内圆 (φ18mm) 同材质的铝合金管, 铝合金管内通 0.1MPa 压力的氮气以吸收各种热负荷, 冷屏内外均为真空环境。透过真空多层绝热夹层由外杜瓦箱体到达冷屏表面的热流, 可通过冷屏冷却管内氮气的吸热量由下式计算得出^[6]

$$Q_f = q_m c_p (T_{f1} - T_{f2}) \quad (4)$$

式中, q_m, c_p 分别为工质流体的质量流率和定压比热容 (80K 为 1.19kJ/kg·K; 90K 为 1.08 kJ/kg·K), T_{f1} 和 T_{f2} 为流体的进、出口温度。

实验进入稳定状态时将流速控制在流速为 2.5m/s (即质量流为 2.78g/s), CTB 实验件冷屏在实验过程中的温度曲线如图 8 所示, 由图可知氮气的进、出口温度分别为 78K 和 93K, 则工质流体从管道吸收的热量为 47.5W。

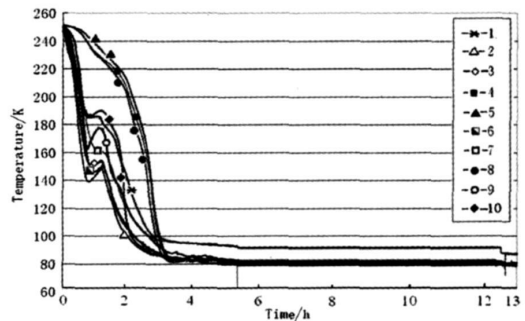


图 8 CTB 实验件冷屏降温时的温度曲线

Fig 8 Temperature curve on thermal shield when Testing-CTB cooling down

由此可得此多层绝热的表观热导率为 $3.74 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

4 结论

由以上实验结果可以看出, 采用称重法测得多层绝热结构的当量热导率, 略大于采用量热法测得的数据结果, 这主要是流量计对小流量气体的不敏感性而造成的误差, 但二者都在同一个数量级内, 其结果仍然都是可信的。

通过将该两种方法测得的当量热导率结果与理论分析结果对比, 尤其是与 CTB 原型件实验结

(下转 50 页)

增函数, 而 $J_0(x, H)$ 可作为的 x 和 H 递减函数。因此, 在 $x = 0.05 J_c$ 有最大值, 这是由于 Gd 掺杂引起的两种不同效果共同作用的结果。

4 结论

我们已经报导了多晶样品 $Y(Ba_{1-x}Gd_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$ 的 T_c 和 J_c 值随 Gd 掺杂量的变化。65K 时在磁场中, Gd 掺杂导致 J_c 的提高可以很清楚地被看到。 T_c 随着 x 的增加而单调减小, J_c 在 $x = 0.05$ 有最大值。两相样品的特征行为可能来自于 Gd 掺杂导致两种效果同时作用的反平衡。一种是超导性的变化, 另一种是纳米范围内空间分布的非均匀性。

致谢: 感谢南京大学吴小山教授和王智和教授的在实验上的帮助。

参考文献

[1] Harada T, Yoshida K. The effects of Pr- doping on the critical current density in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Physica C, 2002, 383: 48.

[2] Bames P N, Kell J W, Harrison B C, et al. Minute doping with deleterious rare earths in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films for flux pinning enhancements [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 012503.

[3] Nazarova E K, Nenkov K, Fuchs G, et al. Effects of calcium substitution on the superconducting properties of

$R_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_z$ (R = Eu, Gd, Er, $0 < x < 0.3$) polycrystalline samples [J]. Physica C, 2006, 436: 25.

[4] Melikh A, Zouaoui M, Ben Azzouz M, et al. Effect of nanometer Al_2O_3 addition on structural and transport properties of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Physica C, 2007, 460-462: 426-427.

[5] Blackstead H A, Dow J D. Effects of R- doping (R = Pr^{3+} , Nd^{3+} , Sm^{3+} and Eu^{3+}) on the pinning properties in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Appl Phys Lett, 1997, 70: 1891.

[6] Harada T, Yoshida K. The effect of rare- earth substitution at the Ba site on the flux pinning properties of $Y(Ba_{2-x}R_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$ (for R = La, Pr and Nd) [J]. Physica C, 2003, 391: 1.

[7] Wang F, Lin J, Xu X N, et al. Spin gap characteristic of $Y(Ba_{1-x}Gd_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Physica C, 2000, 13: 3.

[8] Bean C P. The atomic structure of growth interfaces in Y-Ba-Cu-O [J]. Phys Rev Lett, 1962, 8: 250.

[9] Chen D X, Sanchez A. Superconducting transport properties of grain boundaries in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bicrystals [J]. Phys Rev B, 1992, 45: 10793.

[10] Vaalhyathan L S, Rangarajan G. In- plane aligned $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates [J]. Cryogenics, 1991, 31: 913.

[11] Civalle L, McElfresh M W, Mawick A D, et al. Weak links and dc SQUIDs on artificial nonsymmetric grain boundaries in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Phys Rev B, 1991, 43: 13732.

[12] Xu S, Wu X S, Gao J. Effects of Gd_2O_3 addition in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ on the critical current density [J]. J of Appl Phys, 2008, 103: 07C714.

(上接 21 页)

果进行对比分析可知, 在现有生产条件下 (CTB 体积较大不方便烘烤) 制作的多层绝热被, 性能基本稳定, 其当量热导率只能达到 $5 \times 10^{-4} W / (m \cdot K)$ 的量级水平, 但基本上可以满足设计要求。因此, 本实验结果为下一步进行大规模生产提供了可靠的技术支持。

参考文献

[1] Engineering description ITER Design description document 11 magnet [R]. 2004.

[2] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社,

2006: 229-256.

[3] 陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 72-85.

[4] Augusto Paul A, Castelo_Grande Teresa, Augusto Pedro, et al. Optimization of refrigerated shields using multilayer thermal insulation. Cryostats design _ analytical solution [J]. Cryogenics, 2006, 46: 449-457.

[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] 闵桂荣, 郭舜. 航天器的热控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 330-340.