

低温装置材料表面辐射系数实验研究

吉爱红

武松涛 廖子英

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

摘要:材料表面辐射系数与材料的种类、壁面的温度以及材料的表面状况有关。文中对不同材料的不同表面和不同温度情况下的辐射系数进行了实验研究, 为低温装置系统表面处理工艺方法提供了依据。

关键词:辐射系数 热负荷 表面处理

1 前言

HT-7U 超导 Tokamak 聚变实验装置是中国科学院等离子体物理研究所承建的国家“九五”大科学工程项目。为有效降低 HT-7U 超导托卡马克装置低温系统热负荷, 必须尽可能减小 HT-7U 装置各部件对 HT-7U 内、外冷屏的传导、对流、辐射传热。减轻辐射传热则可通过热屏蔽和改变材料表面辐射系数的方法实现。组成封闭空间的两物体之间的辐射换热计算式为

$$q_{\text{rad}} = \frac{F_1 \sigma [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]}{(1/\epsilon_1) + (F_1/F_2)[(1/\epsilon_2) - 1]} \quad (1)$$

F_1 、 F_2 为热、冷壁表面积, T_1 、 T_2 为热、冷壁温度, ϵ_1 、 ϵ_2 为热、冷壁表面辐射系数, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 取值为 $5.67\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。式(1)对于球形夹层、圆筒形夹层及平面形夹层都适用。由式(1)可知, 在夹层的尺寸及两壁面温度给定的情况下, 辐射换热量是随夹层壁面的辐射系数而变, 壁面的辐射系数越小则辐射换热量越少。HT-7U 冷屏材料表面辐射系数对 HT-7U 冷屏总的辐射热负荷的影响较大, 而且内真空室的温度越高, 其影响越为显著。冷屏材料表面常用的处理工艺有抛光、贴铝箔、镀膜(金、银、铝)等。不同的处理工艺其经济花费不同, 因此应对不同表面处理工艺形成的冷屏表面辐射系数开展必要的测试实验, 以确定 HT-7U 超导托卡马克装置冷屏及真空室的经济合理的表面处理工艺, 从而合理降低低温系统的热负荷。

2 实验原理

在无外界传热的情况下, 若通过通电加热热壁的方法来升高热壁温度, 则通电加热热壁所产生的热量应为热壁温度升高所吸收的热量与热壁对冷壁的辐射热之和。设加热丝电阻为 R , 通电电压为 U , 热壁材料比热为 C , 密度为 ρ , 热壁体积为 V , t 时间内, 热壁温度升高 ΔT , 则

$$\epsilon_{\text{rad}} = \frac{U^2 t / R - c \rho V \Delta T}{\sigma F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]} \quad (2)$$

$$\text{以及} \quad \epsilon_1 = \frac{1}{(1/\epsilon_{\text{rad}}) + (F_1/F_2)[(1/\epsilon_2) - 1]} \quad (3)$$

· 本文于 2001 年 11 月 12 日收到。

$$\text{和} \quad \epsilon_2 = \frac{1}{1 + (F_2/F_1)[(1/\epsilon_{\text{相对}}) - (1/\epsilon_1)]} \quad (4)$$

材料表面辐射系数 ϵ 随着材料的温度升高而增大,但在 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 以内, ϵ 可近似看作一个不变的量,因此由式(2)求出 $\epsilon_{\text{相对}}$ 后, ϵ_1 和 ϵ_2 中只要已知其中的一个值,就可以求出另外一个值. HT-7U 超导托卡马克装置真空室的温度有三种状态,即停机时室温 300K、运行时 373K、烘烤时 473K. 所以通过实验来测定辐射系数 ϵ 的值时,只需对实验装置本体内真空室温度为室温、373K、473K 三种状态时进行计算. 实验时,装置本体真空度达 $3 \cdot 10^{-7}\text{Pa}$, 为高真空状态,可忽略气体对流及传导热;装置本体内真空室和冷屏之间无接触,无固体热传导;整个装置本体浸泡在灌有液氮的杜瓦内,所以外界对冷屏亦无传导和辐射热. 则由加热丝通电加热产生的热量应为内真空室温度升高所吸收的热量与内真空室对冷屏的辐射热之和. 式(2)中, T_1, T_2, U, R, t 可经测量或由仪器的读数直接得到. ΔT 为 t 秒内内真空室温度升高的度数, V, F_1, F_2 可由内真空室和冷屏的尺寸计算得出, c, ρ, σ 为常数.

3 实验方案及实验步骤

3.1 实验方案

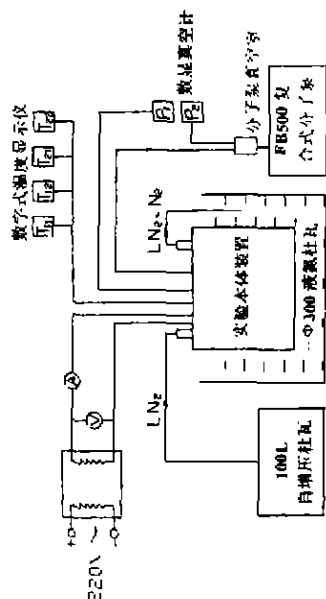


图1 实验连接示意图

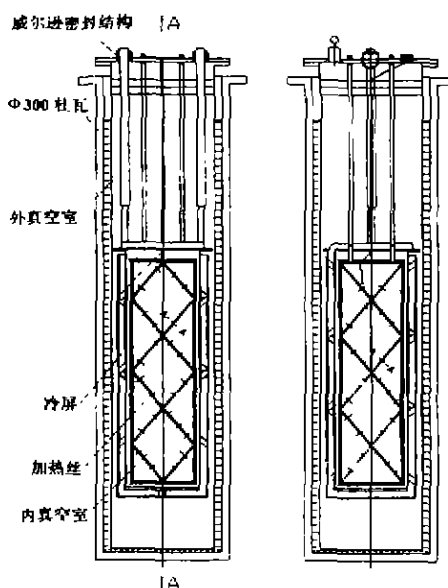


图2 材料表面辐射系数实验装置

实验装置本体与各仪器及设备的连接示意图如图1所示。

本实验共分三轮进行。每轮实验因实验装置本体部件材料表面处理工艺的不同而不同。实验装置本体如下图2所示。装置本体包括内真空室、冷屏、外真空室等三个主要部件。实验时,整个装置本体浸泡在灌有液氮的内径为 $\Phi 300\text{mm}$ 的杜瓦内,使外真空室的工作温度保持在 80K 左右,以防止外界对冷屏的热辐射. 内真空室为圆筒型结构. 圆筒外壁上固定有直径 $\Phi 3\text{mm}$ 的铠装电阻丝,对铠装电阻丝通电可以加热烘烤内真空室. 冷屏采用夹层结构,方管呈双螺旋形缠绕在内、外桶之间,方管间距约为 150mm. 方管内的冷却介质为液氮,使

冷屏温度保持在 80K 左右。第一轮实验时,冷屏内桶的内表面抛光处理;第二轮和第三轮实验时,冷屏内桶的内表面贴铝箔。内真空室和冷屏分别由两根和四根细长吊杆(可忽略传热)吊装在外真空室法兰上。

3.2 实验步骤

首先进行内真空室表面和冷屏内层内表面均为抛光(表面光洁度等级 7)工艺处理的实验。

第二轮实验时内真空室为抛光工艺,冷屏内层的内表面则为贴铝箔处理。

第三轮实验时内真空室表面涂无光泽黑漆,冷屏内层内表面为贴铝箔处理工艺。

4 实验结果及其结论分析

表 1 辐射系数 ϵ

冷屏表面(80K)		内真空室表面(抛光▽7)		
铝箔	抛光(▽7)	300K	373K	473K
0.173	0.200	0.214	0.277	0.313

表 1 为经实验得出的数据计算出的实验装置本体内真空室和冷屏在不同表面状况及不同温度下的辐射系数 ϵ 的值。由材料表面辐射系数实验测得的材料不同表面、不同温度下的辐射系数 ϵ 的值可知,相同表面情况下,温度越高,则其表面辐射系数的值越大;从实验结果总的趋势可看出,在相同温度下,同种材料表面贴铝箔比表面抛光时的辐射系数值要小。本实验结果将为 HT-7U 内、外冷屏及内、外真空室表面处理工艺方法提供依据。

参 考 文 献

- [1] 阎守胜,陆果.低温物理实验的原理与方法,北京:科学出版社
- [2] 达道安.真空设计手册,北京:国防工业出版社
- [3] 杨世铭.传热学,高等教育出版社

Experimental Study on Surfaces' Emissivity of Cryogenic Devices

Ji Aihong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016)

Wu Songtao, Liao Ziyang

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031)

Abstract: The emissivity of object surface is decided by its material, temperature and roughness. From the test of emissivity between different surfaces at different temperature, this paper finds a economic way to treat the surfaces of the cryogenic devices.

Keywords: Emissivity, Heat load, Surface treat

作者简介: 吉爱红,男,1973年生。硕士。现在南京航空航天大学机电学院从事机械设计与理论领域的教学与科研工作。