

金属壁面红外辐射能的测试技术研究

南京航空学院 任苓华 郑际睿 雷英

【摘要】 本文介绍了金属壁面红外辐射能的测试方法、测试原理和测试设备,并对铁板和不锈钢板的红外辐射特性进行了初步的实验研究,研究加热温度对材料辐射率的影响。试验结果表明该测试方法是可行的,测试设备是可靠的。

一、引言

近几年来,迅速发展起来的飞行器红外隐身技术是航空科学技术中的重大课题之一。目前,世界各国对红外隐身技术正在开展综合性的研究,所采用的技术措施有:红外抑制技术、喷口遮挡技术、改变燃料成份、采用隐身涂料以及机载有源干扰等等。以上这些技术措施就其原理来讲,都是通过降低飞行器的红外辐射能量或改变飞行器的红外辐射特性,使敌方红外探测器不易探测,从而提高飞行器的生存能力和战斗能力。那么,当采用了以上各种红外隐身技术措施后,飞行器的红外辐射特性又是如何变化的呢?很显然,要对以上问题作出定量分析研究,只有借助于科学的测试技术和可靠的测试系统才能实现。也就是只有具备了各种强有力的红外测试手段,才能使隐身技术的研究向纵深方向发展。

由于飞行器大量的红外辐射能是由金属壁面产生的,因此我们首先对金属壁面的红外辐射能的测试原理、测试设备进行了研究,从而为金属壁面的红外辐射特性的定量分析研究铺平道路。

二、实验装置

本实验装置如图1所示。本实验所采用的主要仪器有高温管式电阻炉和HYF-1A型红外辐射探测仪。高温管式电阻炉的作用是用来加热试件,使被测试件得到所需的加热温度。

红外辐射探测仪用来探测试件发出的红外辐射能。它主要由热释电探测器(简称探头)、锁相放大器、调制器和有效光栏组成。热释电探测器是一种接收红外辐射能的部件,在探头前部有一个窗口,只允许

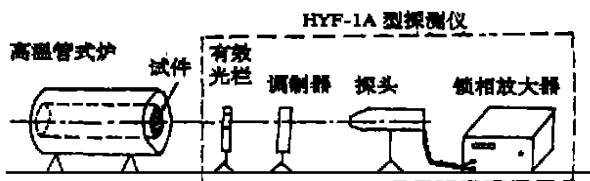


图1 实验装置

波长为 $0.13 \sim 9.5\mu\text{m}$ 的红外辐射能通过,并照射到内部的光敏面上,经热电效应,按比例地产生一热释电电流。锁相放大器将热释电电流放大并显示出读数。调制器的作用是把被测

试件发出的辐射能调制成具有一定频率的交变信号,以防止外界其它辐射源干扰。有效光栏主要用来控制辐射视场角。

三、实 验 原 理

由斯蒂芬-波尔兹曼定律可知,黑体的总辐射力为:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中, T 为黑体的绝对温度,比例系数 $\sigma = 5.76 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 称为斯蒂芬常数。

根据克希霍夫定律,一般可当作灰体看待的物体,其辐射力为:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

式中: ϵ 称为物体的辐射率。

辐射率 ϵ 不仅与物体本身的性质,表面状态有关,而且还与物体的表面温度有关,故只能通过实验求得。当求得了物体在某温度 T 下的辐射率后,则物体在此温度下发出的红外辐射能可由下式求得:

$$Q_{\text{红外}} = \epsilon \sigma T^4 A [F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)] \quad (3)$$

式中, A 为辐射源的面积, $F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)$ 为红外辐射能在总辐射能中所占有的百分比,可在辐射函数表中查得,其中 $\lambda_1 = 0.76 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 100 \mu\text{m}$ 。

因此,要研究某物体的红外辐射能随温度的变化关系,也就转化为研究物体的辐射率随温度的变化关系,有了这个关系,物体的红外辐射能就可以从式 (3) 中计算出来。

1. 辐射率 ϵ 的计算公式: 图 1 的辐射换热可简化成图 2 形式。

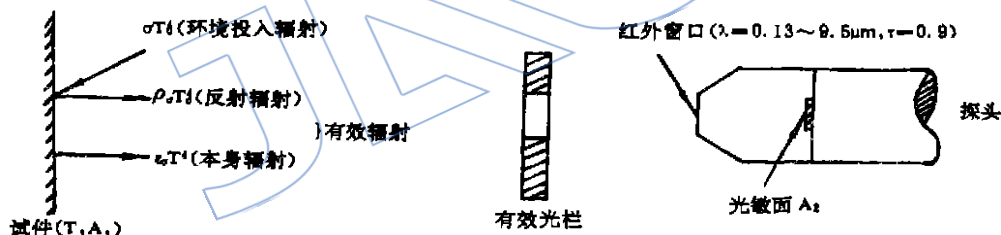


图 2 辐射换热简化图

如图所示: 物体的有效辐射是由其本身辐射 ($\epsilon \sigma T^4$) 和它对环境投入辐射的反射辐射 ($\rho \sigma T_e^4$) 组成的,而有效辐射是我们在物体外面能够感受到的或用仪器可以测量出来的物体的实际辐射。当物体的温度处于中、高温范围时,物体的反射辐射能量 $\rho \sigma T_e^4$ 与其本身辐射能量 $\epsilon \sigma T^4$ 相比要小得多,故可忽略不计。这样,物体向外发出的总辐射能 $Q_{\text{总}} = \epsilon \sigma T^4 A_1$, 其中 A_1 为辐射源的有效辐射面积。而这部分辐射热流由于有效光栏的遮挡限流作用,以及探头红外窗口的滤波作用,只有部分能量到达探头的光敏面 A_2 , 所以光敏面 A_2 接受到的辐射热流为:

$$Q = \epsilon \sigma T^4 A_1 \varphi_2 \tau [F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)] \quad (4)$$

式中, φ_2 为辐射源 A_1 对光敏面 A_2 的辐射角系数, τ 为探头红外窗口的穿透率,其值为 0.9, $\lambda_1 = 0.13 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 9.5 \mu\text{m}$ 。

另一方面,探头光敏面接受到的红外辐射热流 Q 与锁相放大器的输出信号 (即仪器读数) W 之间存在着——对应的函数关系,即 $Q = f(W)$ 。而此函数关系是仪器本身所固有的,称为热电转换函数,它可通过用标准黑体标定而求得。

故

$$f(W) = \epsilon \sigma T^4 A_1 Q_2 \tau [F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)]$$

从中可解得

$$\epsilon = f(W) / \sigma T^4 A_1 Q_2 \tau [F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)] \quad (5)$$

由此可见,只要知道了辐射源的有效辐射面积 A_1 、角系数 Q_2 、及仪器的热电转换函数式 $Q=f(W)$,就能通过此式求出在不同温度 T 下的辐射率 ϵ 。

2. 有效辐射面积 A_1 的确定: 实验装置中的辐射光路如图3所示。

如图所示,设有效辐射面 A_1 的半径为 r_1 ,探头光敏面 A_2 的半径为 r_2 ,有效光栏孔的半径为 r_3 ,探头到有效光栏和有效辐射面 A_2 的距离分别为 L_1 , L 。

由几何光学原理可得:

$$r_1 = r_2 + (L/L_1)(r_3 - r_2) \quad (6)$$

式中 $r_2 = 1\text{mm}$, $r_3 = 2.5\text{mm}$ 。

这样,通过对 L_1 , L 的测量,即可由此式算出有效辐射面 A_1 的半径 r_1 。

3. 辐射角系数 Q_2 的确定: 由于光敏面面积 A_2 要比试件有效辐射面积 A_1 小得多,因此这二个表面间的辐射可视作一微元面与一有限圆盘表面间的辐射。如图4所示。

在 A_1 表面上任取一圆环 dA_1 , 则 $dA_1 = 2\pi r dr$, 因为 A_1 , A_2 表面平行, 故有 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 。

设圆环上任一位置与微元表面 A_2 的连线为 S , 则有 $S^2 = r^2 + L^2$, 又 $\cos\theta = L/S$, 将前面这些关系代入微元表面与有限表面间的角系数表达式^[1], 则有:

$$Q_1 = \int_1 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi S^2} dA_1 = \frac{1}{\pi} \int_1 \frac{L^2}{(r^2 + L^2)^2} \cdot 2\pi r dr = \frac{r_1^2}{r_1^2 + L^2}$$

由角系数的互换性

$$A_1 Q_2 = A_2 Q_1$$

可得

$$Q_2 = r_2^2 / r_1^2 + L^2 \quad (7)$$

4. 热电转换函数 $Q=f(W)$ 的确定: 若被测试件是标准黑体, 则 $\epsilon = 1$, 故此时探头光敏面接受到的热流为:

$$Q = \sigma T^4 A_1 Q_2 \tau [F_b(\lambda_2 T) - F_b(\lambda_1 T)] \quad (8)$$

通过对标准黑体在不同温度 T 下逐点标定, 可得到一组一相对应的 $Q \sim W$ 数值。这样, 在试验中只要知道了仪器的读数值 W , 即可由此关系确定辐射源对探头光敏面的投入辐射热流 Q 。

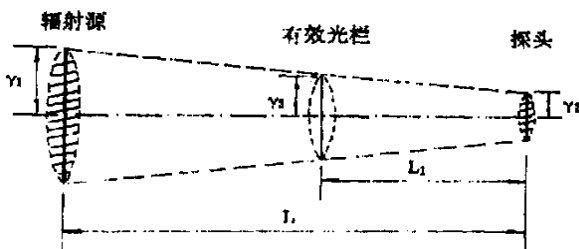


图3 辐射光路图

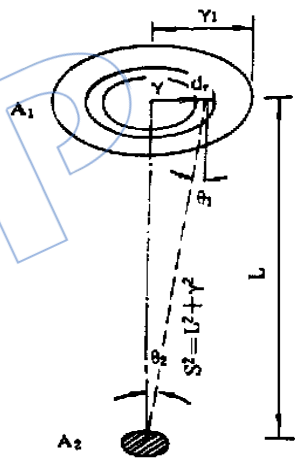


图4 辐射角系数的计算

四、试验结果

1. 热电转换函数 $Q=f(W)$ 的标定结果: 改变标准黑体炉的加热温度, 就能从式(8)

Q ~ W 关系标定结果

辐射热流 $Q (\times 10^{-4} \text{ W})$	40.0	66.9	104.8	156.3	223.9	310.4	419.0	552.7	715.2	910.3	1147.2
仪器读数 $W (\text{mv})$	7.27	12.00	21.49	31.26	49.21	62.59	95.27	122.99	161.48	206.51	284.04

中计算出与仪器读数值 W 相对应的一组热流值 Q , 其标定结果如上表所示:

2. 辐射率 ϵ 测试结果: 用本试验装置对普通铁板和不锈钢板 ($1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$) 材料进行测试, 其测试结果如图 5 所示。

从图中可以看出, 随着加热温度的不断增加, 铁板和不锈钢板的辐射率也随之上升。铁板的辐射率的变化范围大致在 0.4 ~ 0.8 之间, 不锈钢板的变化范围在 0.2 ~ 0.4 之间, 此实验结果与文献 [2] 提供的数值较为吻合。通过以上试验, 说明上述介绍的测试方法和测试系统是可行的。

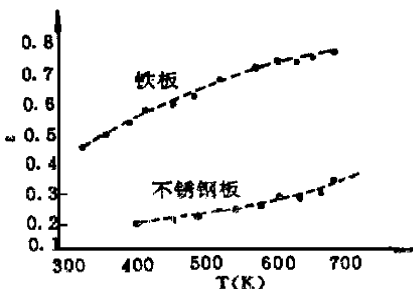


图 5 铁板和不锈钢板辐射率随温度的变化曲线

五、误差分析

本试验的主要误差来自于两个方面。其一是, 在推导辐射率 ϵ 的计算公式时, 略去了试件对环境投入辐射的反射和探头光敏面的本身辐射, 如果不忽略这些次要因素, 则将会使辐射率的计算冗长复杂, 以致给计算带来一定的困难。由计算知, 当试件温度高于 400 以上时, 环境辐射的影响就可忽略不计, 其所引起的误差小于 1%, 所以本测方法在中、高温区域是有较高精度的。其二是, 在分析计算辐射源 A_1 的有效面积时, 在本试验中采用了 A_1 的辐射全照区面积来计算的, 而没有考虑晕光区的影响。这样, 也将会带来一定的误差。

参 考 文 献

- [1] 卞伯绘, “辐射换热的分析与计算”, 清华大学出版社, p. 58, 1988 年。
- [2] 钱滨江等, “简明传热学手册”, 高等教育出版社, p. 398。

heating conditions. As a result, the best flow pattern for the heat exchange coefficient in which the annular flow zone is the longest without "burn down". Then the empirical formulas have been found for designing. The results of numerical calculation are in good agreement with the data of tests.

MEASURING TECHNIQUE FOR INFRARED RADIATION OF METALLIC SURFACES

Ren Linghua, Zhen Jirui, Lei Ying

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

A testing principle, method and apparatus for measuring infrared radiative energy of metallic surfaces are presented. The infrared radiation characteristics of irons and stainless steels have been investigated experimentally. The effects of the temperature on the infrared radiative energy of metal materials are considered. The experimental results illustrate that this testing technique is applicable and the measuring apparatus is reliable.

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN TURBULENT SEPARATED FLOW OVER A FORWARD-FACING STEP

Duan Xinran

(*Lanzhou Railway Institute*)

A. Baron and F. K. Tsou

(*Drexel University, Philadelphia, U. S. A.*)

W. Aung

(*National Science Foundation, Washington, DC, U. S. A.*)

ABSTRACT

An experimental study of heat transfer in turbulent separated flow over a forward-facing step is reported in this paper. The present work deals with a quite small forward-facing step model (step height $H = 4.0\text{mm}$), therefore a special technique that can change the relative locations of heat flux gauge from the step is applied successfully.

The investigation is focused on two recirculation zones. Measurements of heat transfer are performed in Ludwig Wind Tunnel by the transient technique, which demonstrates a new method of experimental research in this field. Within the range of Reynolds number 11800 to 32200, the distribution of wall heat flux and the distribution of Nusselt number are obtained. Those distributions show that the heat transfer coefficient increases to the first maximum value near the step in the front recirculation zone and the second maximum occurs at the reattachment point in the downstream recirculation zone where this point is fixed roughly at $X/H = 2.5$ for the five different Reynolds numbers. The second maximum is larger than the first for same Reynolds number. At last a correlative equation between Reynolds and Nusselt numbers is presented.