

双膜热流计的研究及其应用

北京航空学院 曹玉璋、麻省理工学院 A.H.爱普斯坦

摘 要

本文对用于测量涡轮叶片和涡轮外环换热的高频双膜热流计进行了理论分析,并给出了对双膜热流计的校验方法,阐明了双膜热流计的设计及其应用。

一、前 言

目前在瞬态换热设备上,广泛地采用单膜热流计进行热流测量,由感受的温度随时间的变化来换算成热流。这种热流计由于频响高、不破坏被测表面外形等优点,故近年来得到很大发展。但是,在理论上把单膜热流计视为半无限的一元问题来处理,而在实践上“半无限”与“一元”又是两个有一定矛盾的假设,因此在使用上有一定的限制。另外,用可加工陶瓷来制作模型,也带来材料和工艺上的困难。为此,本文提出了双膜热流计方案。它为涡轮的热流测量,提供了新的手段。

二、双膜热流计的理论分析

以卡普顿(Kapton-Polyamide)绝热薄膜(25 μm)为热流计的基体,用纯镍膜(0.26 μm)为感受部构成双膜热流计。它可以同时测量低频热流和高频热流,所以它具有宽广的频响范围。本质上,位于绝热膜两侧面上的镍膜是两个热电阻温度计,它们分别测量绝热膜两侧面上的温度随时间的变化。由于绝热膜的厚度远远小于另两个方向上的尺度,所以可把双膜热流计视为一元平壁,如图1所示,其微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

其初始条件:当 $t = 0$, $0 \leq x \leq l$ 时, $T = T_i = \text{const}$

其边界条件:当 $x = 0$, $t > 0$ 时, $T = T_1(t)$

当 $x = l$, $t > 0$ 时, $T = T_2(t)$

若以过剩温度 θ 表示某一瞬时温度 T 与初始温度 T_i 之差,即 $\theta = T - T_i$,代入以上诸式,并经适当运算,最后得表面热流 q_s 的解为

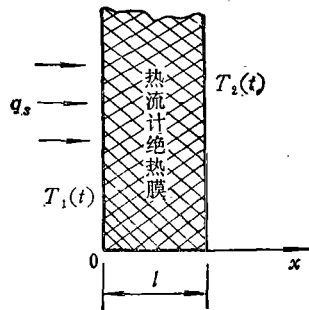


图1 一元平壁

Fig.1 One-dimensional plane wall

1985年1月28日收到。

$$q_s = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\partial \theta(0, \tau)}{(t-\tau)^{1/2}} d\tau + B \quad (2)$$

其中

$$B = \int_0^t \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=2}^{\infty} e^{-\frac{a^2 n^2}{4(t-\tau)}} \frac{\partial \theta(0, \tau)}{(t-\tau)^{1/2}} d\tau$$

$$n = 2, 4, 6, \dots$$

$$- \int_0^t \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{a^2 m^2}{4(t-\tau)}} \frac{\partial \theta(1, \tau)}{(t-\tau)^{1/2}} d\tau$$

$$m = 1, 3, 5, \dots$$

$$A = \sqrt{\rho c k}$$

$$a = l / \sqrt{\alpha}$$

t , τ 为时间, α 为导温系数。

由 (2) 式可知, 当在实验中测得热流计两侧表面上的温度随时间的变化时, 便可以算出热流值。

由于 (2) 式中包含表面温度的微分项, 因此测量噪声会严重地影响测量精度。为减少噪声干扰, 对上式进行如下处理,

$$\text{令} \quad \theta_1(t) - \theta_1(\tau) = Z_1$$

$$\theta_2(t) - \theta_2(\tau) = Z_2$$

将上述变换代入 (2) 式和 B 中, 最后得到

$$q_s = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{\theta_1(t)}{\sqrt{t}} + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\theta_1(t) - \theta_1(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right\} + B \quad (3)$$

$$B = \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \left[\sum_{n=2}^{\infty} e^{-\frac{a^2 n^2}{4t}} \frac{\theta_1(t)}{\sqrt{t}} - \int_0^t \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a^2 n^2 Z_1}{4(t-\tau)^{5/2}} e^{-\frac{a^2 n^2}{4(t-\tau)}} d\tau \right.$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^t \sum_{n=2}^{\infty} e^{-\frac{a^2 n^2}{4(t-\tau)}} \frac{Z_1}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \left. \right] - \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \left[\sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{a^2 m^2}{4t}} \frac{\theta_2(t)}{\sqrt{t}} \right.$$

$$- \int_0^t \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a^2 m^2 Z_2}{4(t-\tau)^{5/2}} \cdot e^{-\frac{a^2 m^2}{4(t-\tau)}} d\tau + \frac{1}{2} \int_0^t \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{a^2 m^2}{4(t-\tau)}} \cdot$$

$$\left. \frac{Z_2}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right]$$

由 (3) 式可见, 由两个侧面上的温度随时间的变化来计算热流 q_s 是较为麻烦的。不过在计算机广泛使用的情况下, 这并不是不可克服的困难。当然, 也可用神经网络模拟的办法, 直接得到热流值。

三、双膜热流计的校验

在 (3) 式中出现两个综合参数 A 及 a , 它们是绝热材料物性和几何参数的函数。根据薄膜物理揭示的规律, 当其厚度薄到一定程度时, 物质的膜态物性参数与体积物性参数有很大的差别。因此, 这里不能采用已公布的物性资料。为提高测量精度, 本文提出了直接测量上述两个综合参数的校验方案。

将热流计置于真空箱中, 以激光为加热源对双膜热流计的一个表面施以阶跃性等热流, 因此, 可认为热流计两个表面上的边界条件为已知, 即在 $x = 0$ 处, 当 $t > 0$ 时

$$q_{s1} = q_s = \text{const}$$

在 $x = l$ 处

$$q_{s2} = 0$$

在上述边界条件下, 对一元不稳定导热方程求解, 可得到下列二式

$$\theta_1 = \frac{2q_s}{\sqrt{\pi} \sqrt{\rho c k}} (\sqrt{t} + f_1) \tag{4}$$

$$\theta_2 = \frac{2q_s}{\sqrt{\pi} \sqrt{\rho c k}} f_2 \tag{5}$$

其中 $f_1 = 2a \sum_{n=2}^{\infty} n \int_0^{x_{1.0}} e^{-\frac{1}{x_1}} dx_1; f_2 = 2a \sum_{m=1}^{\infty} m \int_0^{x_{2.0}} e^{-\frac{1}{x_2}} dx_2$
 $n = 2, 4, 6, \dots; m = 1, 3, 5, \dots$

$$x_1 = \frac{\sqrt{t}}{an}; x_{1.0} = \frac{\sqrt{t_0}}{an}$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{t}}{am}; x_{2.0} = \frac{\sqrt{t_0}}{am}$$

由校验实验得 θ_1 及 θ_2 , 利用以上知识便可求出综合参数 A 及 a 。当然也可以利用电加热做为热源测量上述参数。

四、双膜热流计的设计

在研制过程中, 首先着眼于热流计的灵敏度。

在测量中, 拟采用电桥来测量感受部由于温度变化引起的电阻变化, 如图 2 所示。

由电桥原理出发, 可导出

$$\frac{dV}{V_f} = \frac{R_2}{R_2 + R_{02}} \frac{dR}{R_f} \tag{6}$$

如果 $R_2 \gg R_{02}$

则 $\frac{dV}{V_f} = \frac{dR}{R_f} \tag{7}$

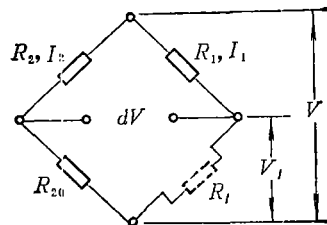


图 2 测量电桥
Fig. 2 Measuring bridge

电阻与温度的关系可表示成

$$R_f = R_{f,20} [1 + \alpha_T (T - 20)] \tag{8}$$

所以

$$dR = R_{f,20} \alpha_T dT \tag{9}$$

其中 $R_{f,20}$ 是金属膜在 20°C 时的电阻值。将 (9) 式代入 (7) 式, 可得

$$\frac{dV}{dT} = V_f \alpha_T$$

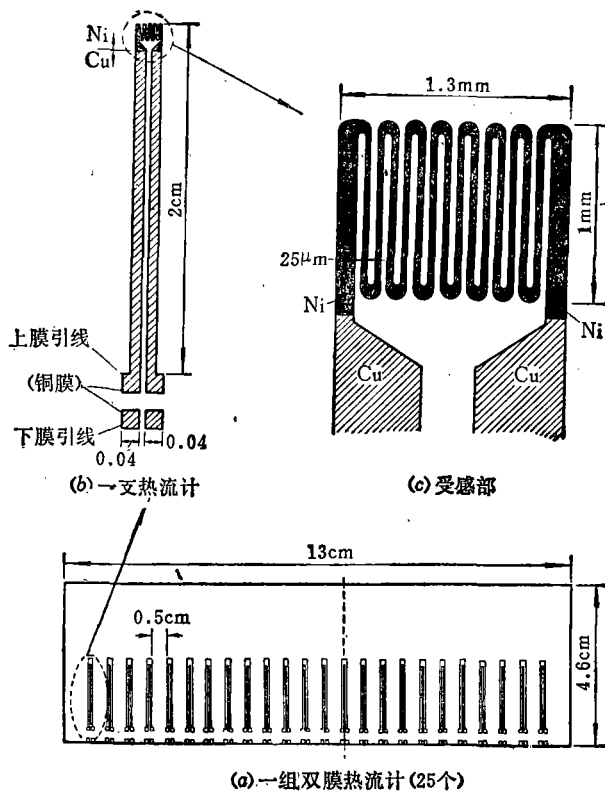


图 3 双膜热流计

Fig.3 Double film gauges

α_T 是电阻的温度系数, 它取决于受感部的材料物性和几何尺寸。热流计两端所能施加的电压取决于热流计对热量的消散能力, 主要取决于其几何形状和尺寸。由此可见, 薄膜的灵敏度主要取决于薄膜的物性、几何形状和尺寸。

对大量不同金属薄膜材料、不同厚度做了实验。并以同样热负荷引起尽可能大的温差为准则, 在几十种绝热膜材料中进行了选择。最后定型如图 3。在 $5 \times 13\text{cm}^2$ 的绝热膜上, 制做 25 个热流计。热流计的参数为: 绝热膜材料为卡普顿 (Kapton-Polyamide), 厚度为 $25\mu\text{m}$; 感受部金属膜材料为纯镍, 厚度为 $0.26\mu\text{m}$, 常温状态下阻值为 $500 \sim 700\Omega$ 。

五、应用技术

将热流计大面积地粘于复杂的被测表面上, 经常会出现表面不平, 热流计与被测表面之间由于粘胶固化过程中释放出气体而产生气泡, 以致使热流计不能在整个被测表面上紧密贴合。本文提出“真空袋压力热固化”方法来粘结热流计。

以实际被测物体表面(如叶片)为模子, 铸一硅橡胶阴模。然后, 按给定的粘结程序洗涤表面和刷胶, 并将热流计覆于被测表面上, 并用硅橡胶模包住已粘结了热流计的试件, 如图 4 所示。随之将这一组合件放入耐温塑料袋中, 并抽真空。最后将这真空袋置于压力加热炉中, 按粘胶给定规范固化。压力加热炉的压力为 $2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

在热流计的设计中, 已考虑了引线的方便。将热流计底面的引线延长, 绕过绝热膜边缘。因此可从热流计的上表面方便地引出上下金属膜的四根引线。

在实验中, 首先应用双膜热流计对涡轮外环的换热进行了测量, 然后对涡轮导向器叶片换热进行了测量。图 5 为涡轮外环的测量结果。

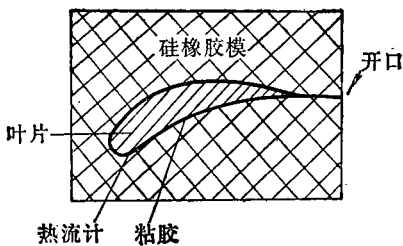


图 4 热流计的粘结
Fig. 4 Adherence of the gauges to the model

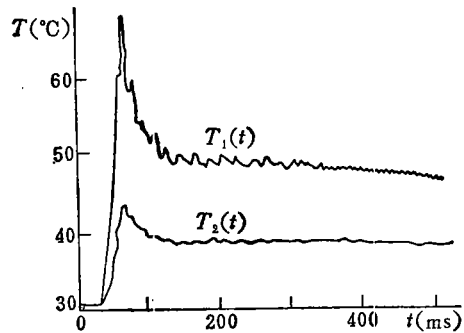


图 5 涡轮外环的测量结果
Fig. 5 Measurement results of a turbine rotor stationary tip casing

六、结 论

通过对双膜热流计的分析, 建立了模型, 并得到理论解。为确定理论解中的两个综合参数, 提出了校验方案。通过大量实验与计算, 确定了双膜热流计的结构与尺寸, 并对其实际应用提出了建议。上述诸方面的工作为双膜热流计的付诸使用做了充分的准备。

参 考 文 献

- [1] Schultz, D. L. and Jones, T. V. Heat Transfer Measurements in Short-duration Hypersonic Facilities, AGARD-AG-165.
- [2] Kercher, D. M., Short Duration Heat Transfer Studies at High Free-Stream Temperature, ASME 82-GT-129.
- [3] Dunn, M. G., Measurement and Analyses of Heat Flux Data in a Turbine Stage, ASME 83-GT-121, 122.
- [4] Larson, D. C., Physics of Thin Film, Advances in Research and Development, Volume 6.

A DOUBLE FILM HEAT FLUX GAUGE AND ITS APPLICATION

Cao Yuzhang

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

A. H. Epstein

(Massachusetts Institute of Technology)

Abstract

A double film heat flux gauge is investigated theoretically and developed to measure heat flux on turbine blades or rotor stationary tip casing in turbine test facilities of short duration. The analysis shows that the heat flux is a function of the temperature histories on both sides of the gauge. It is also a function of two combined parameters which consist of thermal properties and size of the gauge. A method for calibration of the gauge is given. The design criteria and applied techniques of the gauge are described in detail.