

测热传感器研制进展报告

张仕忠, 陈宏, 董志成, 俞鸿儒

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京 100190)

摘要 本文分析了几种常见热流传感器的基本原理, 采用爆轰驱动激波管作为气动加热模拟实验设备, 使用不同热流传感器测出驻点热流值, 从而得出各种热流传感器的适用场合, 为临近空间飞行器驻点区热流率测量提供实验依据。同时, 本文也简要介绍新型测热传感器的研制进展情况。

关键词 爆轰驱动激波管, 驻点热流率测量, 同轴热电偶

引言

随着临近空间飞行器研究的发展, 飞行器表面气动热及热防护技术成为与推进技术并列的高超声速飞行的关键之一, 气动热测量技术在实验研究中越来越重要。

驻点热流的测量关键问题是驻点处的热流冲刷比较大, 对传感器的抗冲刷能力要求比较高, 常用的测热传感器主要分为表面温度计类和量热计类。

表面温度计类是利用表面温度计测出半无限体的表面温度随时间变化的历史, 然后按热传导理论计算表面热流率, 如: 薄膜电阻温度计, 同轴热电偶。量热计类是利用量热元件吸收传入其中的热量, 测量量热元件的平均温度变化率再计算表面热流率, 如塞形铜箔量热计。

1 薄膜电阻温度计

薄膜电阻温度计是将金属薄膜镀在非金属材料上, 当金属薄膜受到气动热时其电阻值发生改变从而测出表面温度, 一般是将铂通过真空溅射的方法溅射到玻璃的表, 铂薄膜的厚度约为 $10^{-8} \text{ m} \sim 10^{-7} \text{ m}$ 。薄膜电阻温度计的优点是反应快, 灵敏度高; 缺点是使用的温度范围较小, 温升过大会导致基底物性发生变化, 从而引起较大误差。抗冲刷能力差, 薄膜与气流直接接触, 经不住含固体微粒气流的正面冲刷。薄膜受气流冲刷过程中自身电阻发生变化而引起严重的实验测量误差。当空气发生解离时, 电阻也会发生变化, 从而

引起较大的测量误差。

2 同轴热电偶

2.1 同轴热电偶原理

热电偶是一种基于热电效应的温度传感器, 其测量原理是将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连接成一个闭合回路。当导体 A 和 B 之间存在温度差时, 两者之间便产生电动势, 因而在回路中形成电流, 这种现象称为塞贝克效应。同轴热电偶的结构如图 1 所示, 将康铜丝穿入紫铜管中, 使用环氧树脂隔离, 通过处理使其表面导通, 从而构成铜-康铜热电偶。

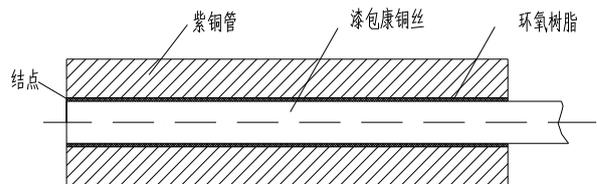


图 1 同轴热电偶热流传感器结构示意图

同轴热电偶优点是频响高, 适用温度范围较宽, 抗冲刷能力较好, 其灵敏度虽然相对薄膜电阻温度计低一些, 但由于驻点热流率大, 信号强度能满足测量要求。这种结构的同轴热电偶体积可以做的很小 ($\phi 1.6 \text{ mm}$ 左右, 长 $1 \sim 2 \text{ cm}$), 便于安装和使用。

基体材料长度至少要大于 $x = 4\sqrt{at}$ 才能被认为是半无限体, 本文中紫铜管长度取 2 cm , 满足条件要求。如果结点是通过镀膜连接的话, 需要镀膜的厚度由膜厚与传感器频响关系公式决定:

$$t = \frac{l^2}{\pi y^2 \alpha} \left(\frac{2-a^2}{2a} \right)^2$$

$$\text{其中: } y = \frac{q_0 - q}{q_0}, \quad a = \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 k_2}{\rho_1 c_1 k_1}}$$

根据半无限体一维热传导理论, 可以得出热流率与模型表面温度的关系, 然后根据数值积分计算, 把表面温度转变成热流率曲线。积分公式如下:

$$\dot{q}_n(t) = \frac{2\sqrt{\rho ck}}{\sqrt{\pi \alpha_R E_0}} \left[\sum_{i=1}^n \frac{E(t_i) - E(t_{i-1})}{(t_n - t_i)^{1/2} + (t_n - t_{i-1})^{1/2}} \right]$$

对于同轴热电偶, $\Delta E / \Delta T = \alpha_R E_0$, 即为铜—康铜热电偶的灵敏度系数, 通过查分度表获得。

2.2 结点对热流传感器的影响

同轴热电偶选用的铜和康铜符合 T 型热电偶材料标准要求, 传感器静态标定结果一致性很好, 在长时间测量场合使用传感器散差很小。虽然结点对传感器的静态标定影响不大, 但在瞬态热流率测量中, 结点对实验结果的影响却变得非常大, 即结点形式对传感器动态特性影响很大。

热流传感器的动态特性直接和结点形式有关, 由于铜和康铜两种材料的 $\sqrt{\rho ck}$ 差异很大, 结点为康铜材料或者为铜材料直接影响实验测量出来的热流值。

图 2 为实际制作的热流传感器, 实际康铜和铜之间的间隙约为 $40\mu\text{m}$, 间隙比较大, 直接使用砂纸打磨也可以使其导通, 但是不容易导通, 即使导通以后, 在实验过程中, 结点也很容易失效。采取一种特殊的机械加工工艺, 可以将端头导通, 并且结点很结实, 但是由于机械加工中生成的结点不可控, 导致传感器散差比较大, 但是同一个传感器的重复性还是比较好的, 实际测量结果比真实值要偏低。

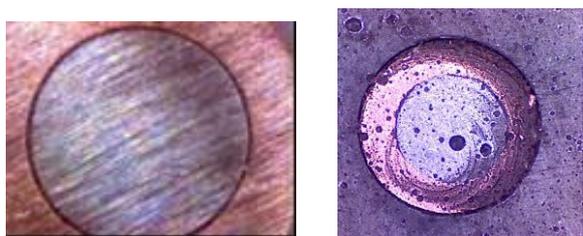


图 2 同轴热电偶端面 (左) 和试验后端面 (右)

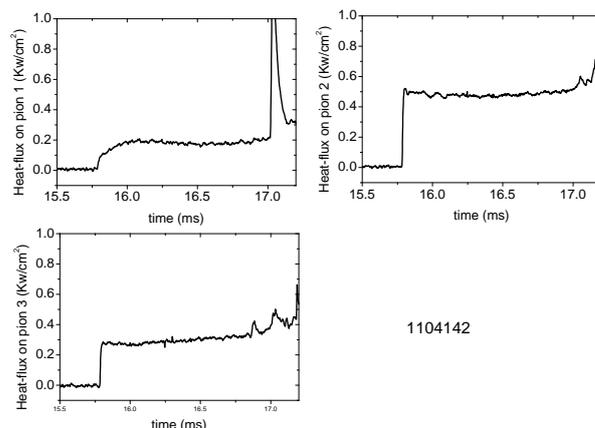


图 3 结点不同测试得出的热流值

图 3 中第一条热流传感器结点在铜上, 第二条热流曲线接近真实值, 第三条热流传感器结点在康铜上, 有此图可以看出结点对瞬态热流测量影响非常大。

2.3 热流传感器结点工艺改进

针对前面提到的结点对瞬态测量影响很大, 对结点形式我们采用真空镀膜和化学镀膜生成。真空镀膜由本室舒勇华同志帮助完成, 在此表示感谢。下图为真空镀膜和化学镀膜传感器端面放大图:



图 4 真空镀膜 (左) 和化学镀 (右) 热电偶端面

实验测试结果显示, 真空镀膜和化学镀膜测量出来的热流值更加接近真实值, 从理论分析上这种镀膜产生结点的方法也更符合设计初衷。化学镀膜膜厚对测量结果也有影响, 所以在热流传感器制作工程中, 必须控制好镀膜的厚度。

另外一个改进就是尽量减少铜和康铜之间的缝隙, 通过特殊加工, 我们将铜管和康铜丝之间的间距减小到了 20 微米左右, 在 20 微米的情况下, 使用砂纸可以很轻松的打磨出结点来, 但是使用砂纸打磨出来的结点同样存在前面的问题, 所以我们还是继续采用化学镀膜工艺。

改进工艺后制作的热电偶测量结果如图 5 所示, 热流曲线比较理想。

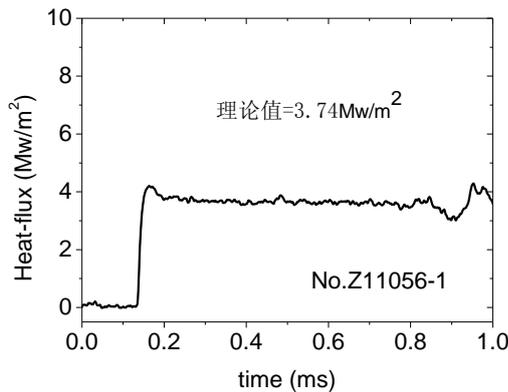


图 5 使用热电偶测量出的热流曲线

采用镀膜生成结点，对镀膜厚度控制要求比较严格，传感器测量结果还是存在一定的散差。由于本实验激波风洞气流冲刷比较大，气体杂质比较多，所以试验一次传感器表面就会产生一层炭黑，如果不除去炭黑层，对后面的测试数据会有一些的影响，但是又由于镀膜比较薄，很容易在去炭黑过程中被破坏掉，所以这种工艺制作的热流传感器在恶劣环境下使用还是存在缺陷的。

在前面的分析中提到，砂纸打磨造成实验测量结果散差很大的原因是因为铜和康铜这两种材料的 $\sqrt{\rho ck}$ 差别很大，从而导致实验结果误差很大。要想解决这一问题，就必须从热电偶的材料着手，所以选择镍洛和康铜这两种材料作为热电偶对，镍洛和康铜材料的 $\sqrt{\rho ck}$ 性能很接近，打磨产生结点测量误差要比铜和康铜打磨结点测量误差小很多，是一种比较理想的耐用性传感器形式，有待继续研究。

3 塞形铜箔量热计

3.1 塞形铜箔量热计原理

塞形铜箔量热计结构如图 5 所示，前端为圆形铜箔，铜箔背面中心处焊接细康铜丝，该处即是热偶节点；圆周附近焊细铜丝，作为铜—康铜热偶引出线；将铜箔用环氧树脂粘在绝热管上。

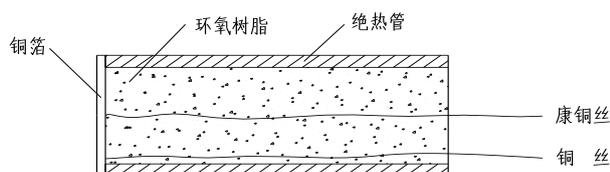


图 6 塞形铜箔量热计结构示意图

塞形铜箔量热计测量原理是假定铜箔背面及侧面绝缘无热损失，则单位面积铜箔在某一时间间隔传入其中的热量应等于铜箔蓄积的热量。

$$q \cdot \Delta t = \sum \rho c \Delta T \cdot \Delta x$$

取极限得

$$q = \int_0^1 \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

若 ρ 和 c 为常数，则

$$q = \rho c \int_0^1 \frac{\partial T}{\partial t} dx = \rho c l \frac{d\bar{T}}{dt}$$

测量出铜箔平均温度变化率就可以求出热流率。

3.2 塞形铜箔量热计实验测量

塞形铜箔量热计制作过程中背面焊接方法有：

1. 点焊法

使用点焊机焊接，由于康铜丝和铜丝都比较细，点焊时需要将康铜丝和铜丝在前端弯折一小段作为焊接压紧部分，然后使用脉冲放电使康铜丝和铜丝和铜片连接起来。其优点：焊接比较牢固，有一定的强度，方便灌封；缺点：需要弯折一段焊接，焊接接点变大，而且焊接有一定压力，放电时会造成铜片厚度变化，从而造成同一批次传感器散差较大。

2. 电镀

通过电镀的方法使热偶丝和铜片导通，设计的初衷是将漆包康铜丝和漆包铜丝垂直压在铜箔背面，通过电流使热偶丝端头和铜箔导通。由于漆包线的疏水性，漆包线表面不会沉淀铜，只有热偶丝端头才会沉积铜，使得热偶丝和铜箔导通，从而达到塞型铜箔量热计的设计目的。理论上讲，这种加工工艺使得热偶丝和铜箔连接处不用弯折，热电偶的节点很小，实验结果应该接近塞型量热计的设计理论值。

3. 机械结构方法连接

采用机械结构挤压方式，有“针接”形式和“卡接”形式两种。

以机械结构方法连接为例，图 7 为塞形量热计测得实际热流值。

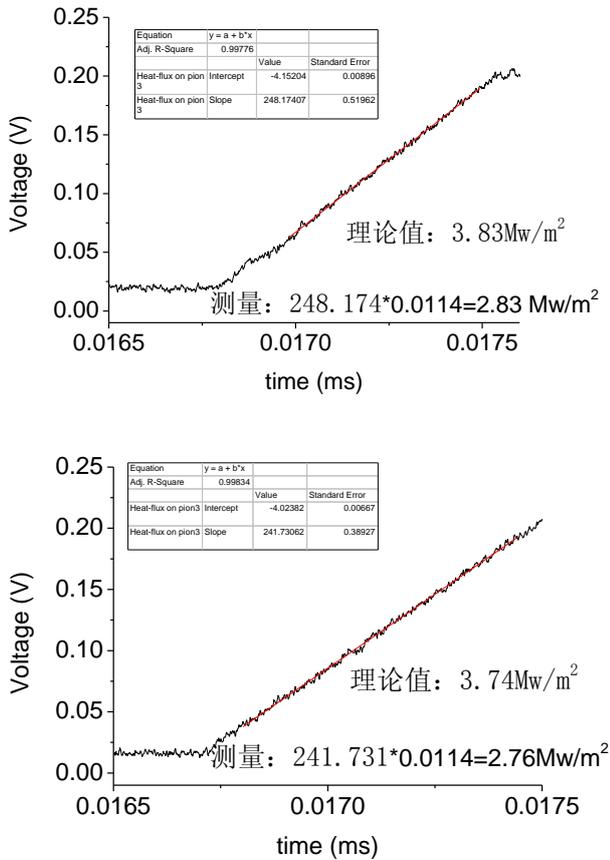


图7 塞形量热计测量的热流曲线

3.3 塞形铜箔量热计分析

塞形铜箔量热计的优点：

1. 铜箔能经受气流冲刷，测温热偶丝在铜箔背面不受气流冲刷影响。
2. 与一般的热电偶相比，塞形铜箔量热计改变了热偶结的结构形式，它以量热片代替了原来的一个接点，以尽可能远离热偶结、尽量细的铜丝引出线代替了从热偶结直接引线的方法，从而大大减小了引出线对结点附近温度分布的影响。
3. 在空气发生解离的情况下也能准确的进行测量。
4. 只要各种参数选择妥当，可以适用于激波管和激波风洞传热测量。

通过改进塞形量热计的制作工艺，可以减少同一批次传感器散差，传感器一致性比较好，但塞型量热计实际测试结果跟理论值比都要偏小。主要因素是以下几个非理想条件：

1. 平均温度难以测量，一般是测量某一点的温度代替平均温度，本铜箔量热计通过测量铜箔背面的温度代替铜箔的平均温度。

2. 采用热偶丝测温，其中热偶丝散热也将影响铜箔的温度分布。

3. 由于结构需要，铜箔背面用环氧树脂与绝缘管粘结，粘附在铜箔背面的环氧树脂吸热也将造成测量误差。

由于以上几个非平衡条件难以克服，所以塞型量热计在实际使用过程中必须先标定然后才能实际使用。

同时，塞型量热计在数据处理中是采用微分形式得出热流值，微分会造成数据处理结果不可预计的误差，所以只能测量定常流，而且得不到热流随时间变化的曲线。

4 新型测热传感器

使用薄膜电阻温度计测出塞形铜箔量热计的背面温度。

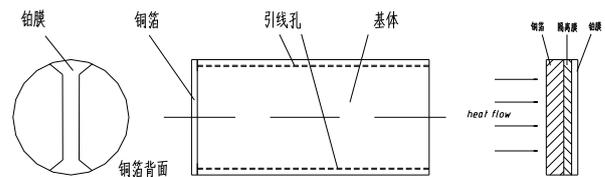


图8 新型测热传感器原理示意图

这种新型测热传感器和以前的塞形铜箔量热计最大区别在于：

以前的塞形铜箔量热计铜箔背面温度是用铜-康铜热电偶测出来的，由于热电偶的输出灵敏度较薄膜电阻温度计低，所以以前制作的塞形铜箔量热计实验结果散差较大，误差也较大。

这种新型设计从根本上改变了量热计测热原理，能够大幅度的提高信号输出灵敏度，且由于薄膜电阻温度计是在铜箔后面，可以避免热流冲刷，其阻值可以保持相对稳定，从而使测热数据更加可靠、精确。

目前这种传感器正在研制中。

5 结论

薄膜电阻温度计适合测量低热流、冲刷小的场合；同轴热电偶重复性和准确性可以保证，可以用来测量驻点区热流率值，其尺寸也可以做的很小，但结点制作工艺需要进一步研究；塞形铜箔量热计

也可以用来测量驻点热流值,但其制作工艺水平限制,尺寸比较大,必须标定后才能使用,后期数据处理方法也还得进一步改进。新型测热传感器,其优点是耐冲刷,灵敏度高,但对其实现原理制作过程需要进一步探索研究,是一种比较理想的热流传感器。就目前阶段来看,同轴热电偶是最容易实现的一种热流传感器,并且其测量效果也比较理想,可以继续发展应用。

参考文献

- [1] 俞鸿儒. 激波风洞传热测量用塞形铜箔量热计. 力学情报. 1976年第4期.
- [2] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Dress, Oxford, 1986.
- [3] D. L. Schultz, T. V. Jones. Heat-transfer measurement in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165.
- [4] 卞荫贵, 气体热力学, 中国科学技术大学出版社, 1997年。

The development Report of Heat-flux Sensors

Zhang Shi-zhong, Chen Hong, Dong Zhi-cheng, Yu Hong-ru

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract By analyzing the principles and using occasions of common heat-flux sensors, self-made coaxial thermocouple heat-flux sensors are used to measure the heat-flux values in stagnation zone in this paper. The detonation-driven shock tube is applied as aerodynamic heating equipment in this simulation experiment, and the temperature-heat conversion data is processed by numerical integration. Finally, an experimental result of heat-flux measurement at stagnation point is provided for near space aircraft.

Key words shock tube; heat-flux measurement; coaxial thermocouple