

# 热流测量技术发展综述

高庆华, 郗殿福

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 文章首先回顾、梳理了热流测量技术的发展过程, 然后将热流计从工作原理上分为基于温度梯度、基于能量平衡和基于半无限大体假设 3 大类, 重点介绍了每一类别对应的热流计结构形式、应用情况和测量范围等, 并对热流计的标定方法进行简述, 最后对热流测量技术的发展趋势进行展望。

**关键词:** 热流测量; 温度梯度; 能量平衡; 半无限大体表面温度; 标定

中图分类号: TK313

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)03-0218-10

DOI: [10.12126/see.2020.03.002](https://doi.org/10.12126/see.2020.03.002)

## The development of heat flux measurement technology

GAO Qinghua, QIE Dianfu

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This paper first reviews the development of the heat flux measurement technologies. It is shown that the heat flux sensors are divided into three categories based on different working principles as the temperature gradient, the energy balance and the semi-infinite body assumption. The structure, the applications and the measurement range of each kind of heat flux sensors are shown. The method for calibrating the heat flux sensor is analyzed, and the development trend of the heat flux sensor is prospected.

**Keywords:** heat flux measurement; temperature gradient; energy balance; semi-infinite body temperature; calibration

---

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2020-06-10

**引用格式:** 高庆华, 郗殿福. 热流测量技术发展综述[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 218-227

GAO Q H, QIE D F. The development of heat flux measurement technology[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(3): 218-227

## 0 引言

在与热有关的各个物理量中,人们最熟悉的是温度,而对热流密度关注较少,因为温度是容易被感知的物体特性,许多热系统也只测量温度,但是热量的运行及去向与温度的重要性相当或更甚,例如:人体的温度虽能表征人的舒适度,但是不能说明人体向周围环境的散热情况,特别是有蒸发发生的时候<sup>[1]</sup>;在航天器热试验时,热边界为辐射热流边界;在高超声速飞行器热防护试验中,热流是最重要的测量参数<sup>[2]</sup>;太阳能利用试验中,需要测量太阳辐射热流密度等。

热流测量的基本原理源于传热学的热传导、对流换热和辐射换热理论,热流计应能对这3种换热方式的热流密度进行单独或综合测量。

热流计的英文名称较多,常见的有 heat flux sensor/gauge/meter、heat flow sensor/gauge/meter、calorimeter、radiometer 等,其中 heat flux/heat flow sensor 等主要用于描述热阻式热流计,calorimeter 主要用于描述热量计,radiometer 主要用于描述辐射热流计。

本文首先对热量测量技术的发展历史进行回顾、梳理,然后基于工作原理对热流计进行分类,逐一介绍各类热流计的结构形式、应用情况和测量范围等,并对热流计的标定方法进行简述,最后对热流测量技术发展前景和趋势进行展望。

## 1 热流测量技术发展历史

### 1.1 国外情况介绍

1914年,德国 Henky 教授为了测量啤酒厂内通过地板的热流密度,用 10 cm 厚的软木板覆盖地板,测出软木板上、下两面的温度差,然后利用温度梯度和软木板的导热系数计算热流密度,就是现在的热阻式热流计的雏形<sup>[3]</sup>。1924年德国的 Schmidt 利用缠绕线结合电镀形成热电堆的方式制成了世界上首个可实用的热流计,即现在的 Schmidt 热流计<sup>[4]</sup>。1939年,Gier 和 Boelter 用在康铜丝上电镀银的方法制成了热流传感器用热电堆<sup>[3]</sup>。1953年 Gardon 提出了 Gardon 热流计的概念,并对其结构、原理及箔片的导热方程进行了详细介绍和推导<sup>[4]</sup>。1969年前后,为了满足高精度热流测量的需求,Epstein 等开始将半导体工艺应用到热流传感器的

制作中,一般是采用 MEMS 工艺,利用阳极氧化、物理或化学气相淀积绝缘介质等技术在硅膜上制备热电堆<sup>[4]</sup>。半导体热流传感器具有更高的灵敏度、量程和分辨率,响应时间短、工作温度范围宽。随着新技术和新工艺的发展,各种新形式的热流计也不断涌现,例如:微型薄膜热流计由热阻层和差分热电堆构成,共 96 个铜-镍热电偶正向串联,冷、热节点分别布置在热阻层两侧,形成差分热电堆<sup>[5]</sup>;一种新型结构形式的热流计,由 40 对热电偶串联排列成圆形,冷热节点分别布置在不同半径的同心圆上,且分别镀上不同厚度的二氧化硅,可根据热电偶的输出电势和不同热阻层的厚度计算出热流密度<sup>[6]</sup>。

进入 21 世纪以来,薄膜技术的发展使薄膜热流传感器在形状、敏感度、价格、时间响应和测量精度等方面得到迅速改进,对瞬态、微小热流密度的测量成为可能,可以满足航空航天领域更高精度和更短响应时间的测量需要。法国 Captec 公司研发的热流比较器,采用 MEMS 技术加工出上百对热电堆,能够在很短时间内测量出极微弱的热流<sup>[7]</sup>。2005年,美国的 Diller 教授研发了横向赛贝克效应热流计和高温热流计(high temperature heat flux sensor, HTHFS)<sup>[8]</sup>,前者灵敏度低,发展前景有限;后者适合测量高温高热流。

### 1.2 国内情况介绍

我国从 20 世纪 50 年代开始热流计的研制工作,中国医学科学院卫生研究所首先进行了热流计及其标定设备的研制,北京工业大学、清华大学等也做了一些工作。20 世纪 80 年代,中国医学科学院卫生研究所开发出硅橡胶软测头热流计,并在现场热工测试中取得了较好的效果<sup>[3]</sup>。

北京航空航天大学的曹玉璋教授在 20 世纪 80 年代研制了单膜和双膜热流计<sup>[4]</sup>;北京科技大学的付军隆博士于 1998 年开发的瞬态热流计能在较短时间内(5~6 min)预测出热流计最终测量结果<sup>[4]</sup>;北京工业大学的杨素君于 2001 年完成了微型瞬态薄膜热流计的研制,在石英基片上溅射铜、镍和二氧化硅薄膜,制成薄膜热流计<sup>[9]</sup>;文耀普和杨素君于 2003 年提出了三线法热流计的研制方案和分析计算<sup>[9]</sup>;陈则韶和杨宝玉于 2003 年研制了全辐射瞬态热流计及其标定方法<sup>[9]</sup>。

目前,应用于航天器热平衡试验的热流计主要有绝热型热流计和热屏等温型热流计2种类型。北京空间飞行器总体设计部研发了卡计法热流计<sup>[10]</sup>,并与中国科学技术大学合作研发设计了双环热保护瞬态辐射热流计(双环热保护热流计)<sup>[11]</sup>。其中,卡计法热流计与热屏等温型热流计的原理基本一致,只是在工艺及结构上略有调整;双环热保护热

流计能提高热流计吸热面温度分布均匀性和测量精度。

## 2 热流计分类

热流计可按工作原理分为基于温度梯度、基于能量平衡和基于半无限大体假设3大类,各类热流计的细分可参见图1所示。

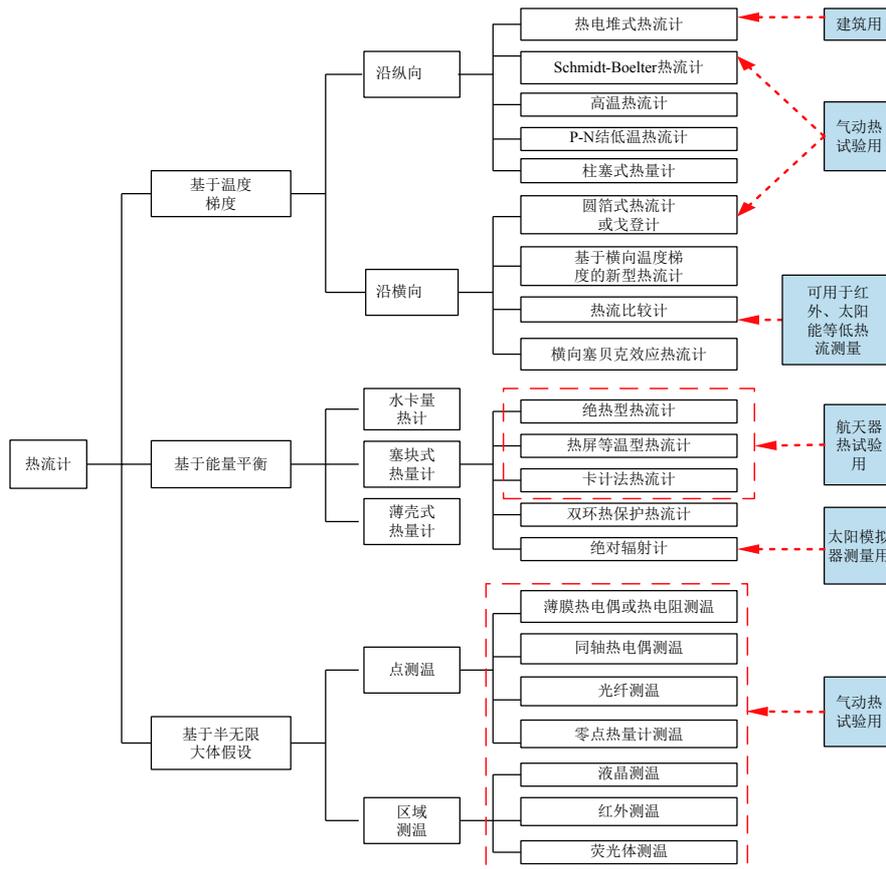


图1 热流计的分类

Fig. 1 Classifications of heat flux sensors

### 2.1 基于温度梯度

这类传感器的工作原理是:当有热流通过热流传感器时,会在传感器的热阻层两侧产生温差,根据傅里叶定律,由测得的温差可以计算出通过传感器的热流密度为

$$q = -\lambda dT/dx, \quad (1)$$

式中: $q$ 为热流密度,  $W/m^2$ ;  $dT$ 为热阻层两侧的温差,  $K$ ;  $dx$ 为热阻层的厚度,  $m$ ;  $\lambda$ 为热阻层的导热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

温度梯度型热流传感器(或称热阻式热流计)是应用最广泛的一类热流计,可以分为沿纵向温度梯度和沿横向温度梯度2种,前者包括热电堆式热流计、Schmidt-Boelter热流计等,后者包括圆筒式

热流计或戈登计、热流比较计等。

#### 1) 热电堆式热流计

热电堆式热流计常用来测量导热热流。由于热阻层两侧的温差不大,热电堆式热流计一般用热电偶串联组成热电堆作为温度检测元件,当热流垂直通过测头时,可以由热电堆产生的热电势推算出温差,

$$E = NS(T_1 - T_2), \quad (2)$$

式中: $E$ 为热电堆输出热电势,  $V$ ;  $N$ 为热电偶对数;  $S$ 为塞贝克系数,  $V/K$ ;  $(T_1 - T_2)$ 为温差,  $K$ 。

随着薄膜技术的发展,可以在热阻层两侧镀热电堆形成薄膜型热流计,其响应时间极短,对周围物理场和温度场的扰动较小。热电堆的基本结构如图2<sup>[1]</sup>所示。

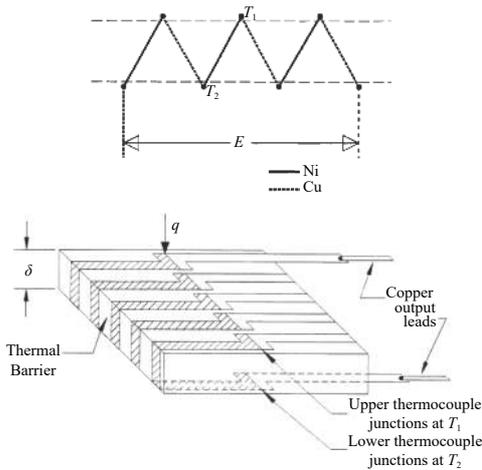


图 2 热电堆的基本结构  
Fig. 2 Basic structure of thermopile

2) Schmidt-Boelter 热流计

Schmidt-Boelter 热流计(S-B 型热流计)的传感器部分是热电堆形式,其结构及实物如图 3<sup>[1]</sup>所示,常用来测量对流换热和辐射换热总热流。

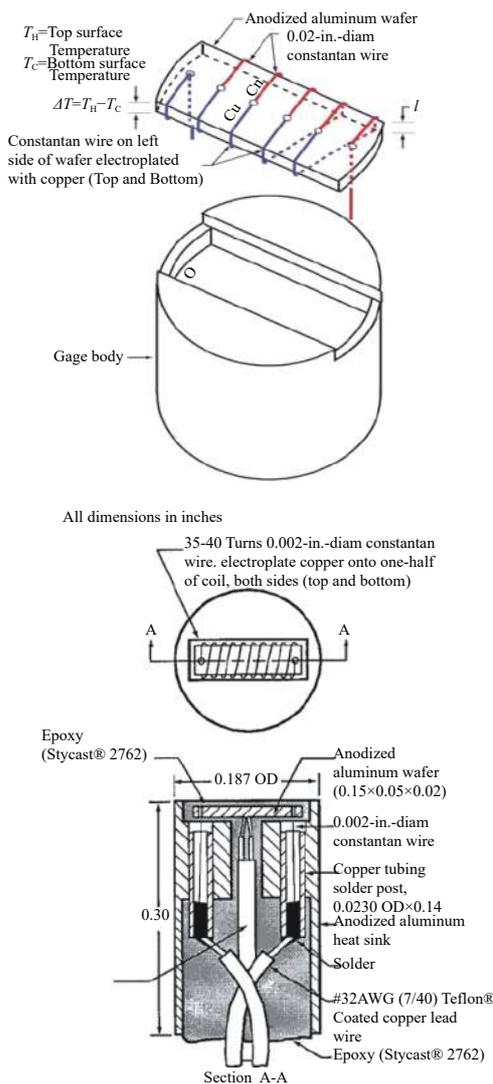


图 3 S-B 型热流计结构及实物  
Fig. 3 Structure of Schmidt-Boelter heat flux sensor

3) 高温热流计

高温热流计由美国的 Diller 提出并研制,如图 4<sup>[7]</sup>所示,其结构为将 2 种不同的金属或者半导体按照热电偶形式串联。相比其他热阻式热电堆热流计,这种热流计无单独的热阻层,由金属或半导体本身充当热阻层,当热阻层两面因外热流产生温差时,会在串联回路中产生热电势,热电势的大小与热流密度成正比。

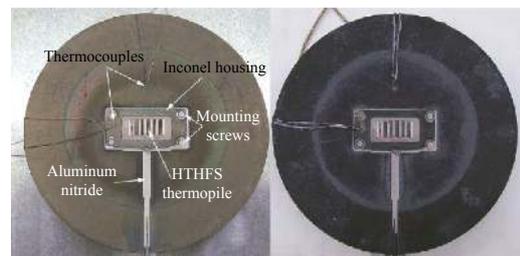
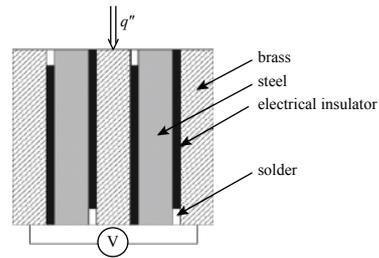


图 4 高温热流计结构及实物  
Fig. 4 Schematic diagram of the thermopile circuit and physical map of HTHFS

4) P-N 结低温热流计

日本的 Haruyama 教授基于半导体的帕耳帖效应,利用 P-N 结制成热流计来测量低热流,如测量低温多层密封管道(如液氮管路)的泄漏情况。半导体的热电势很大,基本为一般金属对的 10 倍左右。P-N 结低温热流计的结构及实物如图 5<sup>[12]</sup>所示。

吸收的热流密度  $q$  与塞贝克系数  $S$  以及 P-N 元件的通电电流  $I$ 、冷结温度  $T_c$ 、导热系数  $K$ 、热结-冷结温度差  $\Delta T$ 、电阻  $R$  有关:

$$q = SIT_c - K\Delta T - 0.5I^2R. \quad (3)$$

在测量电子设备热流时,由于其工作温度高,使用热阻式热流传感器相当于增加了热阻,更不利于设备散热;而 P-N 结热流传感器的吸收热流端相当于冷端,不会影响电子设备的散热(有的根据需要在热端增加水冷)。

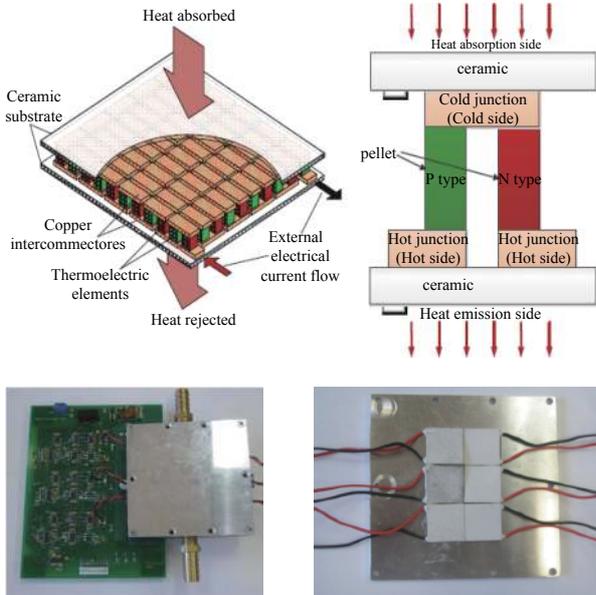


图 5 P-N 结热流计结构及实物  
Fig. 5 Heat flux sensor and thermoelectric cooler

5) 柱塞式热流计

柱塞式热流计将 4 对热电偶安装在加工出的柱子上, 监视温度梯度和柱子内的热量变化, 并通过温度信息推算出热流密度。柱塞式热流计主要应用在高热流、高温、高压(大于 15 MPa)、高速对流环境中, 可以测量稳态热流和瞬态热流, 但误差较大(约±20%)。

6) 圆箔式热流计(戈登计)

圆箔式热流计又称戈登计, 是 Gardon 于 1953 年提出的, 常用来测量辐射热流, 应用较广, 是国内应用最多的热流计。戈登计的原理、结构及实物如图 6<sup>[4]</sup> 所示。将康铜箔表面涂黑以提高其吸收比, 并将康铜箔的四周焊在厚实的紫铜块上; 紫铜块的导热系数和比热容都很大, 因而其温度不易受经康铜箔流入热量的影响, 可看作等于环境温度; 测量长时间大热流时, 一般需要在铜热沉上增加水管进行冷却。康铜箔接收的辐射热流沿径向流向紫铜块, 在康铜箔中形成径向温度梯度, 康铜箔与紫铜块的温度差  $\Delta T = T_o - T_s$ , 与热流密度  $q$  有关。

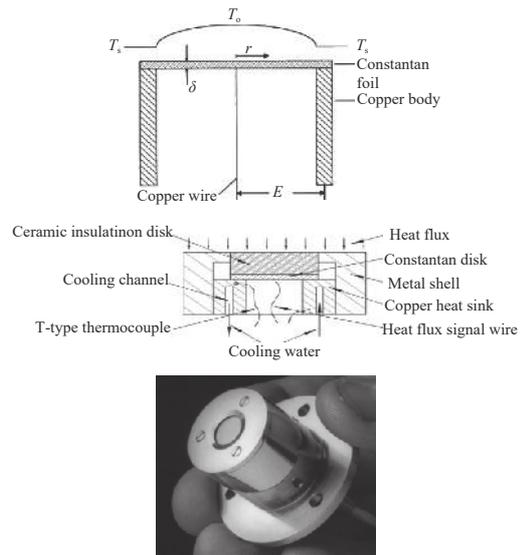


图 6 戈登计的原理、结构及实物  
Fig. 6 Gardon heat flux sensor: principle, structure, and sample

7) 基于横向温度梯度的新型热流计

NASA 的格伦研究中心提出一种新型薄膜热流计, 基本原理是基于横向温度梯度, 如图 7<sup>[6]</sup> 所示。其原理是: 在一块基板上镀上 2 个温度传感器, 并在温度传感器上面分别镀上厚度不同而导热系数相同的陶瓷热绝缘材料, 然后根据 2 个温度传感器测得的温度数据信息计算出所吸收的热流。

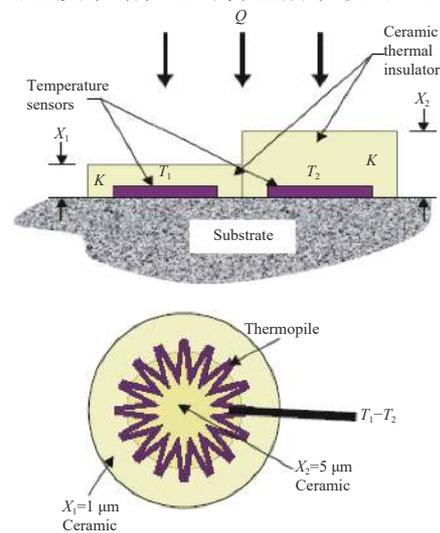


图 7 基于横向温度梯度的新型热流计  
Fig. 7 A novel heat flux sensor based on transverse temperature gradient

8) 热流比较计

热流比较计的基本原理如图 8<sup>[7]</sup> 所示: 在一条低导热系数(如康铜)的金属带上, 部分镀上高导热系数的金属层(如铜), 形成热电堆; 金属带两面均接受热流照射时, 会产生热电势, 热电势的差值与热流密度差值成比例。

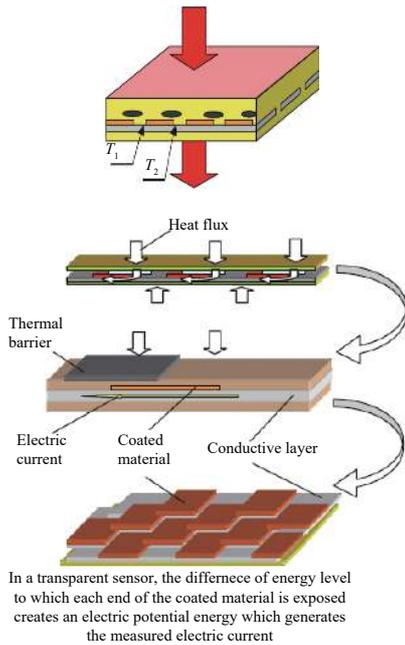


图 8 热流比较计原理及结构

Fig. 8 Schematic diagram of heat flux comparator: principle and structure

### 9) 横向塞贝克效应热流计

在导电、偏离轴生长型薄膜(如  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ) 中可以观测到,在方向与晶体的晶轴不相重合的热流作用下,晶体会产生电场的横向分力,晶体的这种热电响应被称为横向塞贝克效应。但横向塞贝克效应热流计的输出信号小,而且增加材料层数并不能带来灵敏度的提升,最终没能得到应用。

基于温度梯度的热阻式热流计在使用时,一般采取粘贴到被测表面或悬空安装的方式,会对被测温度场产生干扰,且热流计本身会由于温度变化导致热物性参数变化。因此在使用时要求热流传感器尺寸尽量小,且须在使用环境下进行标定,以提高测量准确度。经过精心设计且正确标定的热流计准确度较高,如:热电堆式热流计的测量误差一般小于 3%,性能优良的戈登计可以达到 0.5% 的重复误差,商业用戈登计典型偏差是最大测量值的  $\pm 3\%$ ,Schmidt-Boelter 热流计的测量误差  $\leq 3\%$ 。

## 2.2 基于能量平衡

### 1) 水卡量热计

水卡量热计基于能量平衡原理,假定加热热量全部传递给水卡中的水,则对于一定时间内稳定不变的热流,可通过测量加热前、后水的温度变化,实现热流的测量。由于响应时间较长,这种热流计常用来测量稳态热流。

### 2) 塞块式热量计

塞块式热量计也称热容式量热计,这种热流计原理简单(参见图 9<sup>[2]</sup>)所示),可用于对流、辐射热流,以及稳态或瞬态热流的测量,如电弧加热设备试验的热流测量,但由于漏热和温度的不一致,很难得到精确的数据。

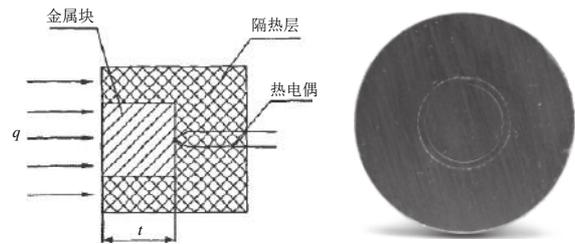


图 9 塞块式热量计原理及实物  
Fig. 9 Schematic diagram of slug calorimeter

### 3) 薄壳式热量计

薄壳式热量计的测量原理如图 10<sup>[2]</sup>所示:在薄金属片模型的背面装上热电偶,假设温度不随金属片厚度变化,而随时间和模型位置不同而变化,即热量沿模型表面横向传导,因此一般要求模型为低导热系数材料,如不锈钢等;同时要求尽量避免沿热电偶导线和模型背面的漏热(经常被认为绝热),以降低测量误差。但是由于薄膜和光学表面温度测量方法的发展,薄壳式热量计已经不再使用。

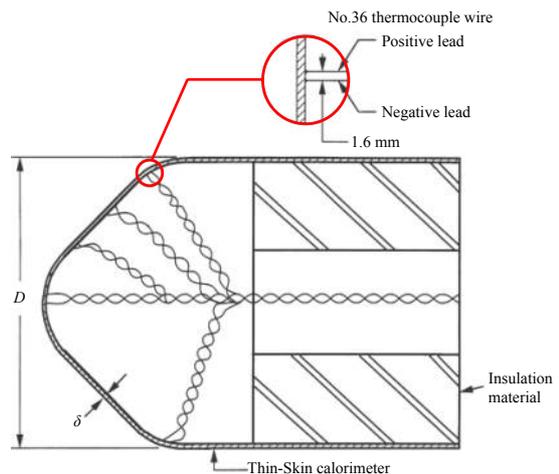


图 10 薄壳式热量计原理及结构  
Fig. 10 Schematic diagram of thin-skin calorimeter

### 4) 航天器热试验用绝热型热流计

航天器热试验用绝热型热流计利用绝热措施使热流计敏感片的漏热减至最小,从而可不考虑敏感片漏热的影响,使热流值与敏感片温度呈单一的

函数关系。这种热流计只能在真空环境下应用,其结构及实物如图11<sup>[10]</sup>所示。

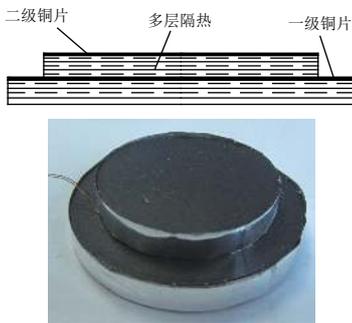


图11 绝热型热流计结构及实物

Fig. 11 Thermal isolation heat flux sensor: structure and sample

敏感片表面喷涂发射率大于0.9的黑漆,在红外笼带条温度与敏感片温度相差不大时,可以近似认为敏感片发射率等于吸收比,则到达被测表面的稳态热流密度为

$$q_r = \sigma T_s^4, \quad (4)$$

式中: $q_r$ 为到达被测表面的热流密度,  $W/m^2$ ;  $\sigma$ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $T_s$ 为敏感片表面温度, K。

#### 5) 热屏等温型热流计

热屏等温型热流计(或吸收式热流计)最早由Ruel等<sup>[13]</sup>在1986年举行的第14届空间模拟会议中提出,其结构如图12<sup>[8]</sup>所示。这种热流计使用前需要标定,可用来测量航天器真空热试验的辐射热流。

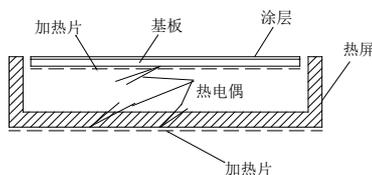


图12 热屏等温型热流计结构

Fig. 12 Structure of isothermal screen heat flux sensor

当热流计在真空低温下使用时,敏感片的热平衡方程为

$$q_a = F_1 \frac{dT}{d\tau} + F_2(T_s - T_h) + F_3\sigma(T_s^4 - T_h^4) + \varepsilon_s \sigma T_s^4, \quad (5)$$

式中: $q_a$ 为敏感片表面的吸收热流,  $W/m^2$ ,  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 分别为由标定数据确定的系数;  $T_s$ 、 $T_h$ 分别为敏感片与热屏的温度, K;  $\tau$ 为测量时间, s;  $\varepsilon_s$ 为敏感片表面的发射率。

#### 6) 卡计法热流计

卡计法热流计的结构形式与热屏等温型热流计基本一致,其关键技术是在热屏和敏感面充分隔热的基础上,采用跟踪控温和热电偶反向串联的方法使热屏和敏感面的温度保持相同,从而可以忽略两者之间的热交换。

#### 7) 双环热保护热流计

双环热保护热流计由中国科学技术大学和北京空间飞行器总体设计部共同研发,其结构及实物如图13<sup>[11]</sup>所示。这种结构能提高热流计吸热面温度分布均匀性和测量精度。

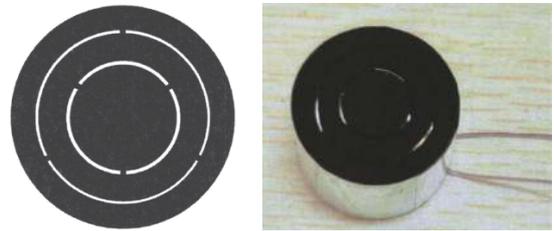


图13 双环热保护热流计

Fig. 13 Heat flux sensor with double thermal guarded plates

#### 8) 绝对辐射计

绝对辐射计可不依赖于任何辐射标准而直接确定辐射标度,是热电型探测器,其基本原理为:根据普朗克辐射定律,将绝对辐射计设计成黑体形式,可以认为其对入射光无选择地完全吸收;辐射计接受辐射后温度上升,利用绝对计内部的电加热器加热使辐射计温升与接受辐射的温升一致,基本上可以达到电量计测精度;但是在设计绝对辐射计时,需要综合考虑背景辐射、热传导及电损失等影响。绝对辐射计一般用于太阳模拟器校准,或作为卫星载荷测量轨道太阳辐照度,获得太阳常数。

上述几种基于能量平衡的热流计或热量计,由于存在水流量、比热容、密度、温差、尺寸等测量误差,水卡量热计和薄壳式热量计的误差一般在5%左右;由于多层漏热,绝热型热流计的稳态误差一般小于4%;热屏等温型、卡计法和双环热保护热流计的稳态误差一般小于5%;绝对辐射计的测量重复性误差很小,仅约0.05%。

### 2.3 基于半无限大体假设

半无限大物体受恒定的热流密度加热时,无限大物体表面的温度变化为

$$T(0,t) - T_0 = \frac{2q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi K\rho c}}, \quad (6)$$

式中:  $T$  为物体温度, K;  $T_0$  为物体初始温度;  $q$  为热流密度,  $W/m^2$ ;  $t$  为时间, s;  $K$  为敏感片材料的导热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\rho$  为材料密度,  $kg/m^3$ ;  $c$  为材料比热容,  $J/(kg \cdot K)$ 。

通过测量物体表面温度变化, 就可以得到其接收热流密度的大小。2 种最常用测量表面温度的方法为通过热电偶或热电阻的点测温, 或以光学方法同时得到整个表面温度分布的区域测温。区域测温也是基于点的温度测量, 只是将大量点温度综合得到温度场分布。常见的点测温传感器有薄膜热电阻、同轴热电偶等; 光学测温最常见的方式有液晶测温 and 红外测温(主要通过红外热像仪)等。

#### 1) 薄膜热电阻或热电阻测温

热电偶正、负极或金属阻层可通过溅射、喷涂等方式镀在测量表面, 一般厚度小于  $0.1 \mu m$ , 测量响应时间为  $0.1 \mu s$  量级, 对被测表面的物理和热扰动极小。热电偶正负极材料须根据测试温度合理选择, 热电阻的主要制造材料为纯金属, 一般选用铂、镍和铜等。热电阻的材料应具有以下特性: 电阻温度系数大且稳定, 电阻值与温度之间有良好的线性关系; 电阻率高、比热容小、响应速度快; 复现性和工艺性好; 在测温范围内化学、物理特性稳定。

#### 2) 同轴热电偶

同轴热电偶由同轴的内、外电极构成, 两极之间是绝缘层, 通过在装配线一端连接 2 种金属形成

薄的热电偶, 如图 14<sup>[2]</sup> 所示。同轴热电偶的响应时间比薄膜传感器长, 约为  $1 ms$  或稍短<sup>[14]</sup>。

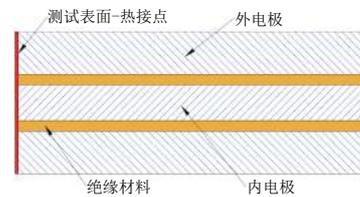


图 14 同轴热电偶结构

Fig. 14 Structure of coaxial thermocouple

#### 3) 光纤测温

光纤测温将光学探头安装在被测表面下实现温度测量。法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉计是光纤测温技术的基础。根据适用温度环境不同, 光纤传感器可以采用不同类型的光纤, 温度低于  $700 \text{ }^\circ C$  时, 采用硅光纤; 温度高于  $900 \text{ }^\circ C$  时, 采用单晶蓝宝石光纤。光纤测温的优点是具有很高的空间分辨率, 且无须电连接。

#### 4) 零点热量计

零点热量计是半无限大表面温度测量方法的扩展, 常用来测量高热流(超过  $1 MW/m^2$ )。为保护热电偶和线缆, 零点热量计安装在被测表面下的孔洞中。零点热量计的几何外形是为使热电偶测量的温度与半无限大表面温度很好符合而设计的, 如图 15<sup>[2]</sup> 所示: 在导热系数较大的金属圆柱体(长  $L$ ) 的底部挖 1 个半径为  $a$  的孔, 在敏感面侧(热流入射方向)保留一定的厚度( $b$ ), 定义坐标  $(0, b)$  位置为零点。假定零点的瞬态温度  $T_b(0, b, t)$  与敏感面温度  $T_s(r, 0, t)$  始终保持一致, 则可计算得到表面的热流密度。

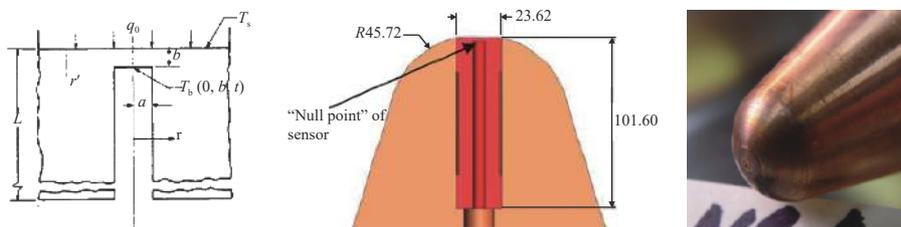


图 15 零点热量计原理、结构及实物

Fig. 15 Null-point calorimeter: principle, structure and sample

#### 5) 液晶测温

液晶是一种介于液体和固体之间的物质形态, 按其分子结构可以分为近晶相液晶、向列相液晶和胆甾相液晶, 其中用于量热的是胆甾相液晶。将热

色液晶涂敷在物体表面, 当表面温度不一致时, 液晶会呈现不同的颜色, 在使用前通过标定获得颜色与温度的对应关系, 即可在使用时通过液晶颜色分布得出物体表面的温度分布, 进而获得热流密度的

分布。

#### 6) 红外测温

红外测温的基础原理是热辐射,当物体表面温度高于 0 K,会发出与表面温度有关的一定强度和波长的辐射能。敏感元件吸收辐射能后温度升高,物理参数也发生相应变化,通过测量敏感元件物理参数的变化,可确定探测器所吸收的红外辐射。

#### 7) 荧光测温

荧光测温的基本原理是:荧光体(光致发光材料)在受到激励光辐照时,会发出一定波长的光,辐射强度决定于物体表面温度。可利用 CCD 相机记录物体表面的瞬态光学影像,再根据标定结果确定表面温度。荧光体的工作原理决定了其在高温领域具有潜在应用前景,但是荧光体的温度标定技术是很大的挑战。

总之,基于半无限大体假设的热流计测量精度受热电阻的测量精度、尺寸、集总热参数的标定精度影响,一般测量误差较大,但小于 10%。

### 3 热流计标定

热流计制成后,由于热流传感器制作工艺及材料性质不一致等因素,导致传感器输出参数很难完全一致,因此在使用前都需要单独标定。常用的标定方法有绝对法和相对法。

绝对法利用标准热流进行标定,常用的标准热流是电加热器和黑体炉,其中:电加热器一般用来标定热阻式热流计,如前文提到的热电堆式热流计;黑体炉一般用来标定辐射热流计,如前文提到的戈登计、Schmidt-Boelter 热流计和热流比较计等。

相对法也叫标准热流计法,一般用来标定辐射热流计,其基本原理是:将待标定热流计与标准热流计同时放置在稳定的辐射源下,利用标准热流计确定辐射热流大小,根据待标定热流传感器的输出,确定输出信号与输入热流密度间的关系。通常采用石英灯组结合可控硅进行辐射热流的控制。

### 4 热流测量技术发展趋势展望

随着深空探测技术的发展,对航天器真空热试验的瞬态热流测量提出了更高的要求;高超声速飞

行器的发展,也对气动热与热防护试验提出了新的要求。不但需要在常规的热流测量技术上发展,还要结合材料、计算机模拟、试验验证等方法手段,引领热流测量技术向测量更准确、响应更快、使用范围更宽的方向发展;同时需要对新方法、新技术、新工艺进行探索,发展和完善新的热流测量技术。总体来说,未来热流计的发展有如下趋势:

1) 微型化。为了减少对被测试件的干扰,适应小区域的热流测量,传感器尺寸越小越好。这已随着 MEMS 技术的发展得到逐步实现。

2) 瞬态响应时间短。航天器真空热试验和气动加热试验中,都有很大的瞬态热流测量需求,因此传感器的响应时间越短越好。目前,热流传感器的响应时间已经达到 s、ms 甚至  $\mu\text{s}$  量级。

3) 低热流和极高热流的测量。在空间环境中,航天器表面最低热流接近于 4 K 的黑体辐射,热流密度基本接近于 0;在航天器真空热试验中,最低热流一般为几十  $\text{W}/\text{m}^2$ ;而在高超声速飞行器上,由于气动热流近似与速度的 3 次方成正比,所以飞行器表面热流密度可以超过几百  $\text{MW}/\text{m}^2$ 。极低和极高热流都对热流计的发展提出了更大挑战。

4) 耐更高温度。随着高超声速技术的进一步发展,飞行器表面温度越来越高,因此需要研制耐高温的热流传感器用于气动热试验,其关键是制造耐高温热流传感器的材料。

#### 参考文献 (References)

- [1] KUTZ M. Handbook of measurement in science and engineering[G]. Wiley, 2013: 629-660
- [2] 刘初平. 气动热与热防护试验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 1-12
- [3] 戴自祝, 刘震涛, 韩礼钟. 热流测量与热流计[M]. 北京: 计量出版社, 1986: 34-37
- [4] 付军隆. 瞬态热流计的开发研制[D]. 北京: 北京科技大学, 1998: 1
- [5] TERREL J, HAGER J, ONISHI S, et al. Heat flux microsensor measurements: AIAA92-5038[R], 2013: 1-9
- [6] FRALICK G, WRBANEK J, BLAHA C. Thin film heat flux sensor of improved design: NASA/TM-2002-211566[R], 2002: 1-14
- [7] Captex Enterprise. Heat flux sensor, for heat flux

- measurement[EB/OL]. [2015-05-08]. <https://www.captec.fr/copie-de-fluxmetre-thermique>
- [8] GIFFORD A R, HUBBLE D O, PULLINS C A, et al. Durable heat flux sensor for extreme temperature and heat flux environments[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, 24(1): 69-76
- [9] 高庆华. 航天器热平衡试验用热流计性能优化分析[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2007: 1
- [10] 邢志芹, 赵啟伟. 卡计法热流计测量瞬态热流的试验研究[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(5): 522-525  
XING Z Q, ZHAO Q W. Experimental study of calorimetric radiometer for measuring transient heat flux[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(5): 522-525
- [11] 绳春晨. 双环热保护瞬态辐射热流计研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 24-48
- [12] ZHANG Y C, JAHNS T M. Power electronics loss measurement using new heat flux sensor based on thermoelectric device with active control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(6): 4098-4106
- [13] RUEL C, LAROUCHE M, DONATO M. Monitored background radiometer[C]//14<sup>th</sup> Space Simulation Conference. Baltimore, MD, USA, 1986: 15-26
- [14] COBLISH J J, COULTER S M, NORRIS J D. Aerothermal measurement improvements using coaxial thermocouples at AEDC hypervelocity wind tunnel No.9: AIAA 2007-1467[R], 2007: 1-11

(编辑: 冯露漪)