

热流计的发展、国际领先技术与改进方向研究*

廖亚非, 张青文, 何容盛

(重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要:热流计是热能转移过程的量化检测仪器,国外已经大量应用在发电、炼钢、化工产品的分解与合成、建筑采暖、空调等热力过程的能耗检测与热能设施的安全保护检测,而我国还处于推广初期。研究自有知识产权的热流计是基于国家经济的发展对节能的迫切需要,创新研究要高于现有技术必须对国内、外现有的技术进行深入的研究,发扬其优势、改进其不足。广泛检索、消化国内、外专利成果与实用技术的基础上对热流计的发展历程进行了概括、对已有的热流计进行了分类、归纳热流计原理和制作方法,综合比较、分析提炼出性价比和通用性最高的绕线热阻式热流计测头及核心技术热电堆,指出其存在的问题和改进的方向。为下一步创新奠定坚实基础,最终使研究获授予中国发明专利权。

关键词:热流计; 传感器; 热电堆; 节能; 检测

中图分类号:0551 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)02-0084-04

Development of Heat Flow Meter and Research on Amelioration of International Advanced Technique

LIAO Ya-fei, ZHANG Qing-wen, HE Rong-sheng

(College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Heat flow meter is an apparatus measuring the transfer of heat energy. In developed countries it is used in detection of energy consumption and safety system of electricity generation, steel making, chemical engineering and building heating and air-conditioning, but it is just a start for its application in China. The research of heat flow meter with own intellectual property is based on the urgent need of energy saving in China. The innovational research must be based on improvement of current technique. In this paper, the progress of heat flow meter is reviewed and the sort and principle of heat flow meter is introduced. The best feeler and the crucial technique of thermopile for heat flow meter in thermal resistance are selected. The disadvantage and ameliorative method is pointed out. At last, a Chinese patent is granted to the authors.

Keywords: heat flow meter; sensor; thermopile; energy saving; detection

节能与环境保护是全球性的紧迫问题,热流计是热能转移、传递的监测仪器。随着我国国民经济的快速增长,一方面能耗缺口逐年扩大,另一方面我国的能源利用率仍然偏低,节能方面大有潜力可挖。人类生产、生活中的能量和用品包括电能和工业产品大都是通过热力过程转换得来,同时能量的耗散也主要集中在这一过程中。如发电、炼钢、化工产品的分解与合成、建筑采暖、空调等都是通过热力过程。因此,降低热力过程的能耗是节能的重点。正如节水、节电需要准确、经济、实用的水流表、电流表进行检测、计量一样;科学、准确的热流计是热能检测、计量的眼睛,通过热流计的检测可以发现什么地方有无谓的热能耗散,什么热力过程不合理,从而准确、合理的采取措施节约能源。经济发达国家对节能检测技术已经走在了前头,我国正在奋起直追,随着国家修订、颁布工业节能和建筑节能规范,必然对检测

* 收稿日期:2005-01-15

作者简介:廖亚非(1955-),男,广东梅县人,工程师,主要从事暖通工程设计、设备研究。

工作和监测仪器有一个大的需求和发展。

1 热流测量技术的发展

热流测量的一个重要方面是针对隔热、保温的维护结构进行的,如炼钢炉的炉墙、化工容器的器壁、建筑的墙体、地板、屋顶等;维护结构的传热过程可用炉墙的传热状况图为例给以说明,见图1,热量(流)从炉内的高温介质传给炉墙内壁,经墙体保温构造传到外壁再传到室外环境中耗散掉。如果将图1的炉内的介质温度换成室内空气温度,图1也表示了一般建筑维护结构的热能散失过程,比如采暖建筑、空调建筑。

应用于现场直接测量热流的热流计,最早出现在1914年。当时德国的Henky教授要测量通过啤酒厂内地板的热流,他用10 cm厚的软木板覆盖地板,测出软木板上下两面的温度差,和软木板的导热系数从而计算出热流密度。是现在所用的热流计的雏型。

1924年,Schmidt设计了由绕在橡胶带上的热电堆组成的带状热流计测头(见图2)用来测量带有保温层的管道的热流密度。一般认为这是第一种实用的热流计。当前广泛应用的热阻式热流计一直沿用了热电堆传感器这一基本型式。

Schmidt热流计测头上的热电堆是用焊接的方式制成的,工艺比较复杂。为克服制作多点热电堆的困难,Wilos和Epps在1919年就研究用电镀的方法制作热电堆,Gier和Boelter在1939年用在康铜丝上电镀银的方法制成了辐射热流计用的热电堆。以后这种方法就逐步推广到制作各种热流计测头,现在使用的热阻式的热流计测头大多是用电镀的方法制成的。Jong和Marquenia推导了这种部分镀银或铜的热电堆元件两端之间的电动势的公式,还进一步分析了各个结构参数对测头灵敏度的影响。De Ponte更进一步分析了测头性能与各个参数的关系,推导出更严密的公式。

随着对高精度热流计的需求,提出了利用半导体材料制作热流计测头,这类测头具有更高的灵敏度。也有采用薄膜热电阻接成桥路测量温度的热阻式测头。还有利用融化潜热及利用加热金属在磁场中产生电位差的Nernst效应的测头。还发展了利用补偿原理测量热流的热流计。利用红外热像技术热像分析和检测热流状况的新技术也得到了很快的发展。热流计的应用领域和形式分类可见表1。

表1 热流计分类

序号	类别	形式	特点及用途
1	测量传导热流	热阻式,采用热电堆原理 埋入式安装 表面贴装式安装 辐射式	埋入被测物体内,用于固体导热测量。 贴装与被测物表面,测量表面热损失。 不与被测物接触,用于物体辐射热流量的测量。
2	测量热流分布	纯辐射式热流计 全热流计	消除对流和其他影响,得到纯辐射热流。 测对流和辐射之和。
3	测量流体输送热流	(热水)热流计	测得的是流体的流量和流体焓值的乘积。
4	测量瞬态变化热流	热容式 温度变化式	利用流体流入传感器后的温度变化测量。

从表1可以看到,热阻式热流计具有最广泛的实际用途。半导体热流计由于成本太高一般用于高端精密仪器。其他热流计应用较少。热阻式热流计的核心技术热电堆也是其他辐射式热流计的核心。

2 热阻式热流计测头的原理与热电堆

热阻式或称温度梯度型热流测头是应用最普遍的一类热流测头。这种测头的原理是:当有热流通过热流测头时,在测头的热阻层上产生了温度梯度,根据付立叶定律就可以得到通过测头的热流密度,

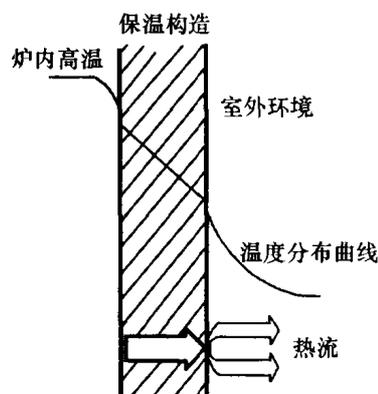


图1 炉墙的传热状况

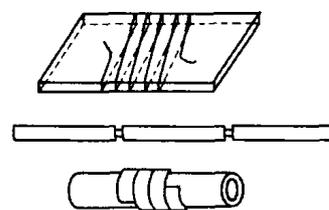


图2 Schmidt热流计

设热流矢量方向是与等温面垂直:

$$q = dQ / dS = - \lambda dT / dX$$

式中: q 为热流密度; dQ 为通过等温面上微小面积 dS 流过的热量; dT / dX 为垂直与等温面方向的温度梯度; λ 为材料的导热系数; 如果温度为 T 和 $T + \delta\Delta T$ 的两个等温面平行时:

$$q = - \lambda \Delta T / \Delta X$$

式中: ΔT 为两等温面的温差; ΔX 为两等温面之间的距离。

只要知道热阻层的厚度 ΔX , 导热系数 λ , 通过测到的温差 ΔT 就可以知道通过的热流密度。当用一对热电偶测量温差 ΔT 时, 这个温差是与热流密度成正比的, 温差的数值也与热电偶产生的电动势的大小成正比例, 因此测出温差热电势就可以反映热流密度的大小:

$$q = C \cdot E$$

式中: C 为热流测头系数, $W / (m^2 \cdot mv)$; E 为测头温差热电势, mv ;

测头系数 C 是热阻式热流计的重要性能参数, 其数值的大小反映了热流计测头的灵敏度。 C 值越小则越灵敏, 有的文献把 C 值的倒数称为灵敏度。为了提高热流测头的灵敏度, 需要加大测头的输出信号, 因此就需要将众多的热电偶串联起来形成热电堆, 这样测量的热阻层两边的温度信号是串联的所有热电偶信号的逐个叠加, 信号大能反映多个信号的平均特性。热电堆型测头的结构示意图如图 3。

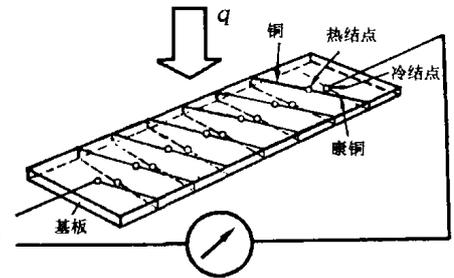


图 3 热流计测头

热电堆的热流计测头是目前应用最广泛的热流测头, 由于节能的需要, 国内也有较多的研究单位在进一步研究、生产。

用电堆型热阻式热流计测头有三个主要优点, 一是可以在测量很低的热流密度(几个 W/m^2) 时输出较大的信号, 便于检测与处理。其次, 这种测头只需要很小的温度梯度就能产生较大的信号, 能测量几个到几万个 W/m^2 的热流密度。三是成本、价格相对低廉适于广泛使用。表面接触式的测头一般用在温度 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 特殊构造的测头可用于 $500 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 现有的热电堆的结构及制作

现有的热阻式热流计测头的制作, 是用金属丝〔如康铜〕先在众多的绝缘板条上绕线圈, 如图 3 所示, 然后将此金属丝线圈〔如康铜〕的一半镀上另一种金属〔如铜〕, 在绝缘板条的两面形成众多串联的热电偶——即串联的热电偶线圈, 图中的小圆圈表示的是铜与康铜的交接点形成热电偶的冷、热节点。多个热电偶线圈再焊接串联或并联后, 平铺粘结在两平面绝缘保护面板间形成热流计测头, 示意如图 4 所示。将热流计测头覆盖在传热面上, 热流在测头两面间形成温度梯度, 从而使热电偶产生温差电压, 从串联的热电偶线圈的两端输出的电压或电流信号可确定通过测头的热量, 从而完成热流的测量。

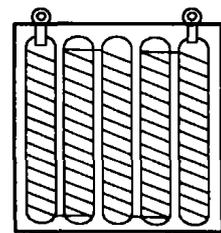


图 4 热流计测头平面示意图

电镀采用的装置如图 5 所示。一般用无氰电镀, 电镀液是: 将蒸馏水 $1\ 000\text{ g}$ 加热到 $50 \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$, 徐徐加入硫酸铜 250 g , 纯硫酸 60 g , 并搅拌到硫酸铜晶体完全溶解就可使用。如果需要镀液较多时, 可按比例增加。

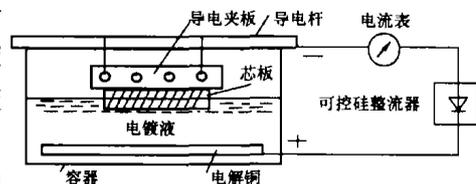


图 5 电镀装置示意图

查阅中国专利数据库和美国专利数据库 1996 ~ 2002 年度用标题〔TITTLE〕: 热流计和 Thermopile 检索, 国内外没有发展和申请绕线式热流计的热电堆。国内有一个关于半导体热流计测头的热电堆的专利。现美国有较多的专利的热流计测头为保证线路一致规范, 都是用半导体技术制成: 线长一致、电阻、电容、电感一致, 可以保证各个测头的一致性, 见图 6 的线路构造。集成电路热流传感器的特点在: 采用集成电路工艺, 以硅膜作介质, 采用扩散和粒子注入、硅外延、阳极氧化、腐蚀多孔硅、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。半导体的成本很高,使其不可能广泛使用,在大多数领域还是使用绕线式热流计测头。

4 结论

热流计在现场广泛实际的使用是在20世纪70年代世界能源短缺以后,就是近30年的事情。当前使用的热阻式热流计测头的热电堆的精度提不

高的问题在:在一片板条上绕线圈只有板条的两个端头接触,无法定型规范,每一圈扁、圆不可能一致,而一个测头有几百圈,使得各个测头千差万别,另外线圈为了电镀必须是裸线,在制作过程中容易碰线从而改变性能,各线圈之间需要多点串连焊接,焊点状况也是各不相同焊点又多。由于结构形式和加工方法决定了各个测头不能一致,只能寄希望于标定。由于各测头的差别大使标定难度加大,需要较高精度的标定设备,标定的过程较长,使得每一块测头的价格较高,影响了在发展中国家的广泛使用,也不可能制成精度较高的线圈式热流计测头。

热阻式热流计测头有三个主要优点,一是可以在测量很低的热流密度(几个 W/m^2)时能输出较大的信号,便于检测与处理。其次,这种测头只需要很小的温度梯度就能产生较大的信号,能测量几个到几万个 W/m^2 的热流密度。三是成本、价格相对低廉适于广泛使用。

随着世界工业国家节能技术的发展,对测量精度要求不断提到,开始制作半导体热流计测头的热电堆。并在研究领域和高端领域应用。但在通用领域仍然迫切需要精度更高的廉价实用的热流计测头。

进一步的发展应使热流计制作工艺简化、降低成本,使线长一致、电阻、电容、电感一致保证各个测头的一致性提高测头的精度,尽可能在较现有的热阻式热流计测头更高的检测精度范围内无需标定或降低标定的成本。为通用领域提供经济实用精度更高的热流检测仪器。

2004年4月9日,再次对中国知识产权局专利数据库进行检索——查得热流计专利共三项,其中两项为本文作者的授权专利。说明我国的热能检测研究还需要有大的发展、扩大范围、增加投入。

参考文献:

- [1] 王化祥,张淑英. 传感器原理及应用[M]. 天津:天津大学出版社,1988.
- [2] 曲波. 工业常用传感器选型指南[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 戴自祝. 热流测量与热流计[M]. 北京:中国计量出版社,1986.
- [4] [苏]B. A 澳希波娃. 传热学实验研究[M]. 北京:高等教育出版社,1982.
- [5] 钱滨江. 简明传热手册[M]. 北京:高等教育出版社,1983.
- [6] 蒋焕文. 电子测量[M]. 北京:中国计量出版社,1988.
- [7] 皮福生. 非电量变换与电测应用[M]. 北京:中国劳动出版社,1991.
- [8] 美国专利文献. THERMOPILE DETECTOR AND METHOD FOR FABRICATING THE SAME US6305840 B1[Z].
- [9] 中国专利文献. 一种集成硅膜热流传感器及其制造方法[Z]. 申 90104888. 7. 专利代理机构:中国科学院专利事务所.

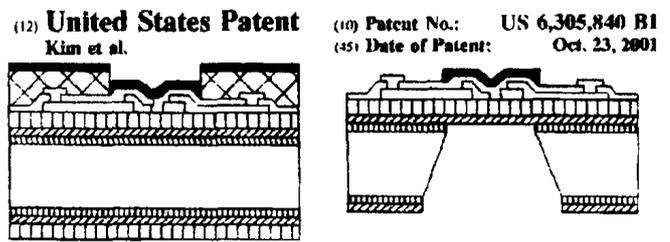


图6 集成电路热流计测头-传感器