

Research Status and Development Trend of Thermal Conductivity Measurement Methods

Xiang Zhang, Zhenyu Huang, Li Xu, Quankun Xu, Kan Kan, Guoguang Wu

Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Geometric and Mechanical Metrology Technology,
Guangdong Provincial Institute of Metrology, Guangzhou Guangdong
Email: zxiang2012@163.com

Received: Jun. 20th, 2018; accepted: Jul. 2nd, 2018; published: Jul. 10th, 2018

Abstract

This article describes the importance of thermal conductivity in the fields of aerospace, microelectronics, materials science, petrochemicals, iron and steel metallurgy, building energy conservation, etc., introduces the measurement method of derivative coefficients, the research process of thermal conductivity measurement methods, the current situation, and looks forward to the development trend of thermal conductivity measurement technology.

Keywords

Thermal Conductivity, Transient Method, Research Progress, Development Tendency

导热系数的测量方法研究现状与发展趋势

张 向, 黄振宇, 徐 立, 徐全坤, 阚 侃, 吴国光

广东省计量科学研究院广东省现代几何与力学计量技术重点实验室, 广东 广州
Email: zxiang2012@163.com

收稿日期: 2018年6月20日; 录用日期: 2018年7月2日; 发布日期: 2018年7月10日

摘 要

本文阐述了导热系数在航空航天、微电子技术、材料科学、石油化工、钢铁冶金、建筑节能等领域的重要性, 介绍了导热系数的测量方法、国内外对导热系数测量方法研究过程、目前状况, 展望了导热系数测量技术研究的发展趋势。

关键词

导热系数, 测量方法, 研究现状, 发展趋势

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

导热系数(Thermal Conductivity), 又称为热导率、导热率, 是重要的热物理参数, 反映材料的热工性能, 是鉴别材料保温性能优良的主要标志, 对工程设计有重要作用。其定义是在稳定传热条件下, 1 m 厚的材料, 两侧表面的温差为 1 度(K, °C), 在 1 秒内, 通过 1 平方米面积传递的热量。符号 λ , 单位为瓦/(米·度), $W/(m \cdot K)$ 或 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。导热系数, 与密度、粘度、电导率等类似, 属于材料的物理化学性质之一, 属于材料本身固有的性质。导热系数的应用十分广泛, 特别是在石油、化工、材料、军工生产等部门的有关传热设计中是必不可少的。为了使工程设计合理, 节省能源和原材料, 提高产品的质量, 都需要有准确且可靠的导热系数等热物理参数的资料。由于导热系数测定仪要用于固体、粉末、涂层、薄膜、液体、各向异性材料等的测定, 再加上伴随材料科学的飞速发展, 对材料的测试方法提出了更高的要求, 即不断拓宽应用范围、提高测试精度和测试速度。因此研制高精度快速的导热系数校准系统有着非常重要的意义。

导热率是固体材料基本的热物性之一, 导热率反映了固体系统能级总的能态, 表示了电子、声子的状态密度与磁激发以及在某些情况下的电磁辐射。随着科学技术和工业的发展, 导热率测定被带到不同的领域, 包括: 航空航天、微电子技术、生物技术、核能技术、新材料开发等高新技术领域, 以及石油化工、钢铁冶金、建筑节能等工业领域。例如, 在军事领域, 所有航天飞行器均经历发射、入轨、飞行乃至再入大气的过程, 经受不同程度的气动加热阶段, 必须采取有效的热控技术, 进行隔热和防热, 这其中就有赖于对各种热物理性质包括导热率的掌握; 在微电子技术中, 超大规模集成电路集成度的飞速提高, 带来许多问题, 对微电子的热物理性的测量也是非常必要的; 农业方面的谷物干燥和储藏过程, 必须了解谷物的导热率; 生物医学研究中, 也对皮肤、血液乃至体内各器官的热物理性质给予关注。而且绝热材料导热率作为表征建筑节能材料物性的重要参数, 其参数值的精确测量有着非常重要的理论和实用价值。建立国内低导热性能材料导热率测量标准装置平台, 可以填补国内绝热材料导热率计量标准和标准装置的空白, 满足全社会对建筑节能材料导热率计量方法的要求。

对航空航天、微电子技术、能源有效利用、核能技术、新材料开发等高新技术领域, 以及石油化工、钢铁冶金、建筑节能、制冷空调等工业领域都具有明显的科学意义和重要的工程应用价值。而且, 制定和统一国内技术标准, 对于提高国家产业的竞争力, 促进科技成果商品化产业化, 打破贸易技术壁垒促进贸易发展, 维护国家和企业利益都具有极其重要的作用。由此可见材料导热率对科学研究和技术开发有着重要的作用。

虽然热物性测量是热量测量的一个重要组成部分, 其核心是准确的温度测量, 和有效的绝热恒温措施。但与温度测量不同的是: 温度是七个基本物理单位之一, 有国际温标, 而且二十年修改一次, 各主要国家计量实验室温度测量的相对标准不确定度在 10^{-5} 次方以内, 热物性测量的相对标准不确定度却在 10^{-2} 左右, 至今只能依靠国际比对来统一不同国家的测量值, 如何提高热物性测量的准确性, 是摆在

各国国家计量实验室面前的重大问题。从为数不多的一些区域或国家间的部分热物性数据比对结果可以看出：即使是同样测量原理的装置，测量结果也会有系统性偏差，而且很难解释清楚这样的系统性偏差产生的原因。以谁的结果为准，也是一个问题。正如美国国家标准与技术研究院(NIST)的研究人员所指出的，究竟是以不同国家的一些准确结果和一些不准确结果的平均值作为推荐值，还是以准确测量作为推荐值？目前，各国大多仍以 NIST 的标准物质热物性测量结果为依据。这不仅仅是一个计量的技术问题，也是国际贸易的技术检验问题。已经成立的亚太区域贸易组织下的材料物性计量一致性组织 ANNET，目的就是追求亚太经合组织国家材料物性数据(热物性参数是其重要组成部分)的一致性。因此，可以预计，材料物性测量结果的一致性作用必然会在世界贸易中有所体现，一致性将可能是一个重要的技术要求，也可能是贸易技术壁垒的一个重要技术手段。作为一个世界贸易大国，迫切需要逐步具备代表国家的热物性测量标准体系，以技术实力为后盾，参与国际热物性测量结果一致性的工作。

材料科学、宇航科技、国防科技、能源科技、大规模集成电路技术和农业的发展呼唤导热率测量标准装置的建立；国际贸易活动，要求对进出口材料导热率进行国际等效的导热系数测量以确保质量；国内导热系数测量能力评价和溯源需要标准装置；各行各业需要准确可靠的材料导热系数共享数据。

2. 导热系数测试方法

导热系数是指在稳定传热条件下，1 m 厚的材料，两侧表面的温差为 1 K，在 1 s 内通过 1 m² 面积传递的热量，定义式公式(1)：

$$\lambda_x = -\frac{q_x}{\frac{\partial T}{\partial x}} \quad (1)$$

式中：

x ——热流方向；对于各向同性的材料来说，各个方向上的热导率是相同的；

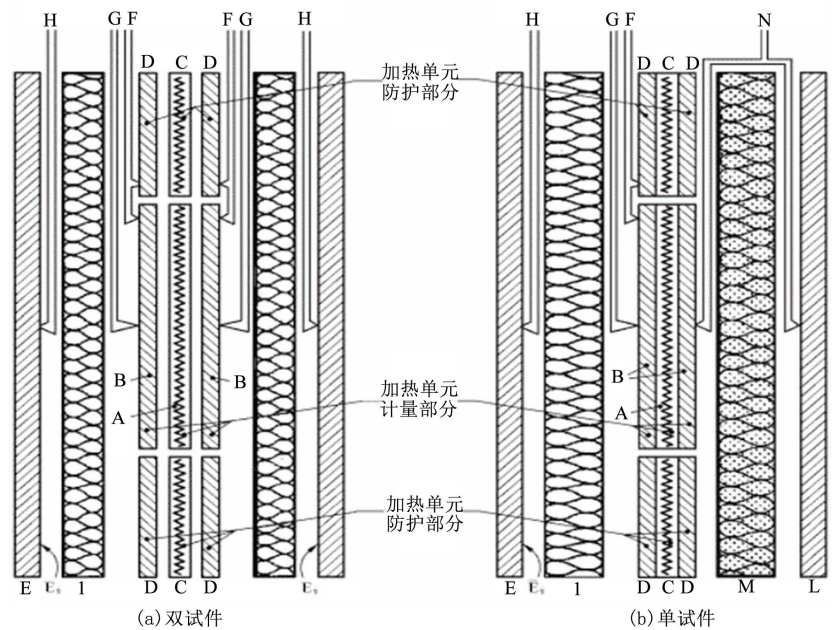
q_x ——该方向上的热流密度，W/m²；

$\frac{\partial T}{\partial x}$ ——该方向上的温度梯度，K/m。

导热系数测试方法，分为稳态法和瞬态法(又称为非稳态法)两类；稳态法有：平板法、护板法、热流计法、热箱法等。瞬态法有：热线法、探针法、热盘法、热带法、激光法等。各种导热系数测试方法，有其自身的适用范围。由于物质具有固、液、气三种状态，不同状态时，其导热系数会差异很大；而不同状态时导热系数的测量也会有很大的不同；相比于固体、液体和气体的导热系数测量更加困难，因为流体状态物质内更容易发生自然对流，温度场会很快发生变化，需要采集的速度相当快(如 1 秒)，以避免自然对流的影响，所以对于仪器的要求会更高。目前稳态法中广泛使用的是基于双试件保护平板法的导热系数测定仪。然而双试件保护平板法普遍存在着测量时间过长、测量范围小、对试件制备要求高、测量结果受接触热阻影响且测量范围小等缺点。而目前瞬态法中应用最广的是热线法，但热线法只适用于导热系数小于 2 W/(m·K)的各向同性均质材料导热系数的测定。

防护热板法测量装置如图 1 所示[1]，其原理是在稳态条件下具有平行平面的均匀板内建立类似于以两个平行的温度均匀的平面为界的无限大平板中存在的一维的均匀热流密度。通过测量热流量 Φ 以及此热流流过的计量面板面积 A ，即可得到热流密度 q ，进而通过测得的被测样品两侧温度差 ΔT ，及被测样品厚度 d ，即可计算出导热系数 λ 。

瞬态平面热源法测量装置如图 2 所示[2]，将热线制作成盘状，夹在两片样品中间，通电使探头发热，记录探头电阻值随温度变化，计算得到导热系数。将硅橡胶等 12 种建筑用的材料样品作适当前处理加工，依次将盘状热线夹在各种材料样品中进行测试。



A-计量加热器; B-计量面板; C-防护加热器; D-防护面板; E-冷却单元; F-温差热电偶; G-加热单元表面热电偶; H-冷却单元表面热电偶; I-试件; L-背防护加热器; M-背防护隔热层; N-背防护温差热电偶。

Figure 1. Measuring equipment of Guarded hot plate apparatus

图 1. 防护热板法测量装置

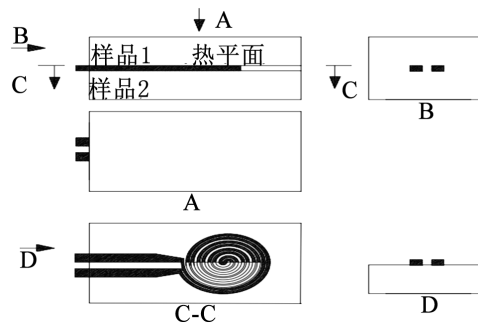


Figure 2. Measuring equipment of transient plane heat source method

图 2. 瞬态平面热源法测量装置

3. 国外研究历程与现状

1753 年, Franklin 提出了不同物质具有不同传递能量能力的概念, 这是导热系数最原始的表述, 1789 年, Ingen 和 Hausz 首次建成了稳态比较法的固体导热系数测量装置。

1931 年, Stålhane 和 Pyk 利用瞬态热线法测量了固体和粉末以及一些液体的导热系数, 开创热线法测量材料导热系数的先河。到现在, 瞬态热线法已经发展到非常完善, 能够测量液体、气体、纳米流体、熔融盐和其他固体等。热线法因为其广泛的应用范围和较低的测量不确定度等优点使其在导热系数测量众多技术上是独一无二的。目前, 热线法应用于液体、气体和固体测量中, 不确定度最好可小于 1%, 而对于纳米流体和熔融盐的不确定度小于 2%。

1961 年, Parker 等人研制成功世界上第一套闪光法测量装置[3]。该装置采用红外灯对试样进行加热, 用 GE FT524 型闪光灯做热激励光源, 将铬镍铝镍热电偶焊接到被测试样的背面对温度及温度曲线进行

测量,并将试样正面涂黑以实现对其均匀加热。利用这套装置, Parker 等人对铜、银、铁、镍等试样在 22℃~135℃ 温度范围内的热扩散率进行了测量,实验效果最好时的测量误差仅达到±5%左右。

1967 年, Moser 等人研制了一套热扩散率测量装置,对 UC、UP 和 US 核工业材料在室温至 600℃ 温度范围内的热扩散率进行了测量[4]。该装置采用红宝石激光器作为热激励光源,用铬-铝热电偶测量试样温度和温升信号,背温信号经差分放大器放大后直接在示波器上绘出相应的温度变化曲线。正是由于 Moser 等人将脉冲激光器引入到热扩散率测试系统中,才形成了从闪光法到激光脉冲法的技术转变。

1994 年, Cezairliyan 等人研制了一套高温热扩散率测量装置。该装置采用两种、共七层隔热材料对实验箱内的试样加热器进行热屏蔽,以降低热传导和辐射热损对测试结果的影响。在实验箱的侧壁上开了一个光学测试窗口,先用光学高温计测量最外层隔热材料的温度,然后根据试样、试样夹持器和各层隔热材料的热传导方程计算出试样的真实温度,热扩散率则是通过硅光电二极管测得的辐射能量信号计算出来的。利用这套装置,对 POCO AXM-5Q1 石墨在(1500~2500) K 温度范围内的热扩散率进行了测量,最大不确定度小于 3%。由于采用交流电流加热方式,因此在温度高于 2500 K 时试样温度波动很明显,这就限制了该装置测量温度上限的进一步提高。

2005 年,由英国国家物理实验室(National Physical Laboratory)发起,联合欧洲多个国家物性研究实验室,联合制定了关于瞬态法测量导热系数的标准-Standard for Contact Transient Methods of Measurement of Thermophysical Properties。

2006 年, Watanabe 等人为了提高高温热扩散率的测量效率,减少将导体材料加热到高温状态所用的时间,在融合电流脉冲加热法和闪光法技术优势的基础上,提出了一种通过测得的背温信号计算热扩散率的新方法——光电混合脉冲加热法[5]。该方法的优点就是对试样加热速度快、试验时间短,可在 1 秒时间内将试样从室温状态快速加热到高温(1500 K 以上)并完成热扩散率测试实验。实验时,一较薄的带状试样被大电流快速加热到高温,在试样温度保持不变的较短时间内激光脉冲经两个矩形视场光阑后,对试样中部固定位置加热。与此同时,用单色光电高温计对试样背面的亮度温度进行测量,然后根据 DOAP 测得的法向光谱发射率计算出试样的真实温度。为了准确测量激光脉冲的工作起始时间,用分光镜将激光脉冲分离出一部分到光电探测器。Watanabe 等人利用这套装置对钨试样在(2000~2600) K 温度范围内的热扩散率进行了测量,实验结果与 Kraev 等人用周期热流法测量的结果具有较好的一致性。

国外在这方面的研究相对国内要多得多,起步比较早,对绝热材料导热率的定性研究测量最早是从德国学者 Lees [6]开始的。Lees 的测试方法基本上接近于理想情况下保护热板装置测试原理,他使用一对环形圆盘形状的薄样品,夹在三个铜板之间,在中心铜板上加一定电功率的热量,并在轴线方向上通过样品传递到两边金属铜板。德国学者 Poensgen [7]采用了一个环形的铜片来保护中心板,并使保护铜片和中心板之间保持温度一致,以防止半径方向的热损失。此外,他还在冷板与热板之间的测试样本周围覆盖了相对低导热率的保温材料以减少侧面热损失,这种方法比 Lee 的方法提供了更好的轴向方向上的线性热流,并能实现对更厚的材料进行较为可靠的测量。此后,德国学者 Jakob 又进行了进一步的改进,即单试样热板保护法,他在中心板另一面利用辅助热板的方法使得热流仅向一个方向上传递,而且中心板与辅助热板之间用绝缘材料隔开。此测试装置对样品导热率的计算公式(2):

$$\lambda = \frac{Qd}{A(T_h - T_c)} \quad (2)$$

式中: λ -导热系数, W/(m·K); Q -中心板加热器加热量, W; d -样品的厚度, m; A -中心板的横截面积, m²; T_h -中心板温度, °C; T_c -冷板温度, °C。

Robinson [8]对保护热板测试方法进行了改进,提出线性热源保护热板法装置,即在中心板与周保护

热板中分别嵌入一个线性热源, 相当于在传统的保护热板法装置使用加热器, 中心板依靠加热丝的合理布置, 使得中心板的边缘温度和中心板的平均温度一致。这种设计就必要用热电偶来测量热板的温度了, 也不会影响热源半径内的周保护板内侧的温度场。因此, 就便于于温度的测量和热保护。后来人们改进为用环形线性热源, 但此种方法设计的保护热板法装置仅在(240~340) K 温度范围内测试具有较高的准确度。

为实现对导热率更为精确的测量, 英国国家物理实验室(NPL)开发了一台用于测量(25~300) mm 的低密度绝缘材料的保护热板测量装置, 测试结果显示, 测试样品厚度在(50~75) mm 之间, 可获得范围在 $\pm(1.3\sim 2.4)\%$ 内的不确定度。最近几年, 为进一步加大测试样品的测量温度范围和获得较宽的测试样品导热率, NPL 又设计了一套高温保护热板装置[9], 该装置测温范围为(100~850) $^{\circ}\text{C}$, 测试样品热阻为(0.5~3.2) $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$, 结果表明在整个温度范围内测试不确定度在 $\pm 5\%$ 范围以内, 并实现了整个测试装置的智能化。最近 NPL 又新设计了一套真空保护热板法装置[10], 可以在空气中测量绝热材料的导热率, 美国国家标准技术研究院(NIST)也建立了直径 500 mm 保护热板法装置, 其测温范围从(90~900) K, 测量的样品厚度可达 110 mm。

热物性测量没有国际标准也没有全球性国际比对, 国家之间的热物性测量标准一致性遇到了较大挑战, 国际计量委员会测温学咨询委员会于 2000 年成立了热物性工作组 WG9, 亚太经济合作组织倡导成立的亚洲材料评估技术网(ANMET)负责亚洲区内经济体间热物性比对, 此外亚太计量组织的亚太材料物性评价网也组织区域材料物性比对[11]。

4. 国内研究现状

中国从事材料热物性测量研究已有三、四十年的历史, 但在国家的材料热物性测量标准文本和权威计量机构建设方面是个空白, 没有能力发布国家的材料热物性标准数据, 不能对测量结果的可靠性提供权威的评估, 也不能提供材料热物性测量的量值溯源服务。目前, 仅是一些科研院所、高校、企业根据各自的需要, 从国外进口大量的材料热物理性质测量分析仪器或自建测量仪器设备, 开展一些材料热物性测量。因为没有权威的国家热物性标准计量机构, 对这些仪器的准确性、可靠性、稳定性不能做检查, 也不能为这些仪器设备提供溯源服务, 对它们给出的测量数据的准确性、不确定度、仪器设备的稳定性不能做权威性评价, 大多是以出产公司提供的产品说明书上的数据为依据。

1978 年, 中国科学院上海硅酸盐研究所的奚同庚等人研制出我国第一台用电子计算机运控的激光热导仪。该装置采用热电偶测量试样温度, 用 PbS 光敏电阻探测试样背面的辐射能量变化。奚同庚等人在 250 $^{\circ}\text{C}$ ~1800 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内分别对 Armco 纯铁和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 试样的热扩散率进行了测量, 实验结果的均方根误差分别为(-3.2%~+3.3)%和(-2.44~+5.6)%。

1980 年, 我国的有色金属研究院研制了一套低温热扩散率测量装置[12] [13]。这套装置采用钨玻璃激光器做热激励源, 用铜-康铜热电偶对试样的温度及温升信号进行测量, 热电偶产生的电信号经补偿和放大后输入到光线示波器。为实现低温测量, 试样及其加热系统均密封在置于液氮杜瓦瓶内的真空室里, 并用三个带有玛瑙尖的螺钉将试样固定在试样夹持器中心位置。对铁、镍等金属材料在-196 $^{\circ}\text{C}$ 至室温温度范围内的热物性参数进行了测量, 实验结果表明热扩散率的相对均方根误差在 $\pm 6\%$ 以内。

1981 年, 中国科学院金属研究所在原有工作基础上也研制成功了一套实验装置[14]。这套装置采用钨玻璃激光器做脉冲加热光源, 用热电偶和光学高温计对试样温度进行测量, 通过 PbS 探测器测得的辐射能量计算热扩散率。何冠虎等人用这套装置对阿姆克铁、铜、陶瓷及石墨试样在(500~1200) K 温度范围内的热物性参数进行了测量, 热扩散率测量误差小于 $\pm 3\%$ 。王补宣院士也利用“平板导热仪”测量绝热材料导温系数[15]。中科院上海硅酸盐研究所[16] [17]对材料导热率测量也做过大量研究。

1993 年, 中南工业大学的张立等人也研制了一套这类测量装置, 室温下的测量结果与权威手册推荐

值有较小偏差。昆明物理研究所研制了一套可对温差电材料等材料的热导率进行测量的装置。这套装置采用 HgCdTe 探测器对(300~400) K 温度范围的辐射能量进行测量,测试温度超过 400 K 时改用 InSb 探测器测量。但当测试温度高于 1000 K 时,由于探测器和热屏蔽光导管的性能都随着温度的升高而下降,因此测量装置的重复性明显降低至 3%。

1998 年,兰州炭素厂的杨洪利研制了一套对石墨材料的热导率进行测试的装置。根据感温元件的性能,分别选用镍铬-镍铝热电偶、硫化铅热敏电阻和硅光电池三种传感器对室温至 2500℃温度范围内的背温信号或辐射能量进行测量。为降低热电偶与试样背面接触程度对测试数据的影响,实验时多采用银糊粘贴方法,并将接触电阻阻值控制在(10~20) Ω 范围内。杨洪利通过这套装置对冷压石墨、石墨电极、心瓣基体等材料在室温至 900℃温度范围内的热扩散率进行了测量,与参考文献推荐值具有较好的一致性。

2000 年,钢铁研究院在原有设备的基础上研制了一套可在室温至 1000℃温度范围内对不易焊接金属材料 and 半透明陶瓷材料的热扩散率进行测量的装置[18] [19]。这套装置用固体钷玻璃单灯激光器对试样进行瞬间加热,真空加热炉为电阻丝炉,用辐射温度计对试样温度进行测量,采用弹簧顶压热电偶的方式对室温至 900℃温度范围内的钨渗铜等焊接性能较差、不易电焊的金属材料和不可焊接的非金属材料的背温信号进行测量。由于热电偶与试样的接触程度对背温信号的测量精度有很大影响,因此该装置的热扩散率测量精度并不是很高。航天一院航天材料及工艺研究所[20]对航天材料热物理性能也做过大量研究。

2008 年,中国计量科学研究院研制出一套热扩散率测量装置[21]。这套实验装置采用钷玻璃激光器做热激励源,加热炉采用铂铑丝做加热元件,用直流稳压电源对其供电,炉温最高可达 1200℃,可根据 K 型热电偶测得的背温信号或硫化铅红外探测器测得的辐射能量计算热扩散率。孙建平等人利用这套装置对 Armco Iron 和 Isotropic Graphite 试样在室温至 1200 K 温度范围内的热扩散率进行了测量,扩展不确定度优于 5%。

国家建材研究院研制的导热系数标准参比板,使用温度范围在(270~373) K,测量不确定度 U_{95} 为 2.5%,使用标准参比板校准导热系数测试仪[22]。西安夏溪电子科技有限公司在十余年科学研究的基础上,成功将热线法导热系数测量技术从实验室应用转化为通用型的导热系数仪,其研发的 TC 3000 系列导热系数仪测量精度最好可达 1%,测试速度只需(2~20) s,对试样的要求更低,不需要特定形状,不需要特定尺寸,块状,片状,膏状,胶体,液体均可,适用范围更广,自动化程度高。测量范围(0.005~100) W/(m·K)。

中国计量科学研究院在国家科技部的支持下,开展了建立保护热板法固体材料导热率测量装置的研究工作,为建立国内材料导热率测量标准装置作好准备。为了验证该测量装置的性能,实验采用德国 PTB 提供的参考物质(有机玻璃),对其在(30~70)℃温度范围内进行导热率测量,结果位于十七个国家实验室和研究机构测量数据的中间位置,与 PTB 测量的结果较为接近。并且进一步在 80℃~530℃温度范围内测量了花岗岩和光学玻璃两种材料的导热率,装置具有高温下准确测量材料导热率的能力。

5. 测量需求与发展趋势

材料的导热系数与材料的种类、状态(气、液、固三种状态)和所处的条件(温度、压力、湿度等)有关;有时候也与材料的组成结构、密度、含水率等因素有关;对于特定种类的材料,其导热系数与材料的大小、形状无关;但对于薄膜类(厚度为微米或纳米级别)材料,其导热系数可能会急剧减小,与薄膜的厚度有关;由于自然界内天然材料种类有限,随着科技的发展,人们开始研究更多种类的材料,使之能在满足特定行业内的特定性能需求的同时,又具有特别高的或者特别低的导热系数;不同的场合,需要材料的导热系数的大小不同:对于需要防止热量散失的场合,材料的导热系数越小越好;对于需要加快热量散失的场合,材料的导热系数越大越好;通常把导热系数较低的材料称为保温材料(国家标准规定,凡平均温度不高于 350℃时导热系数不大于 0.12 W/(m·K)的材料称为保温材料),而把导热系数在 0.05 W/(m·K)

以下的材料称为高效保温材料；导热系数高的物质有优良的导热性能，如导热胶、导热泥、导热脂等，需要有一定的导热系数，以满足传热、导热、散热的需要。

建立国家材料导热系数标准装置，进一步发展材料导热系数测量标准参考物质，建立我国导热系数量值传递体系，制定导热系数测量标准方法和检定校准规程规范是当务之急。进一步开展向低温和高温等极端环境下导热系数测量的研究也将是导热系数研究的一个重要方向。

基金项目

广东省质量技术监督局科技计划项目(2014ZPJ01)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 10294-2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 张向, 黄振宇, 徐立, 等. 瞬态法测量节能材料导热系数的研究[J]. 电力与能源进展, 2017, 5(4): 85-91.
- [3] Parker, W.J., Jenkins, R.J., Butler, C.P. and Abbott, G.L. (1961) Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, **32**, 1679-1684. <https://doi.org/10.1063/1.1728417>
- [4] Moser, J.B. and Kruger, O.L. (1967) Thermal Conductivity and Heat Capacity of Themonocarbide, Monophosphide, and Monosulfide of Uranium. *Journal of Applied Physics*, **38**, 3215-3222. <https://doi.org/10.1063/1.1710092>
- [5] Watanabe, H. and Baba, T. (2006) Electrical-Optical Hybrid Pulse-Heating Method for Rapid Measurement of High-Temperature Thermal Diffusivity. *Applied Physics Letters*, **88**, 1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2211985>
- [6] Salmon, D. (2001) Thermal Conductivity of Insulations Using Guarded Hot Plates, Including Recent Developments and Sources of Reference Material. *Measurement Science and Technology*, **12**, 89-98. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/12/201>
- [7] Poensgen, R. (1967) Ein technisches Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Stoffen. *Z. VDL*, **56**, 1653.
- [8] Robinson, H. (1964) Line Heat Source Hot Plates for Measuring the Thermal Conductivity of Insulations. *ASTM, STP 544*, 167-192.
- [9] Salmon, D. (1996) The NPL High Temperature Guarded Hot Plate Thermal Conductivity. *International Journal of Thermophysics*, **23**, 431-441.
- [10] Stacey, C. (2002) NPL Vacuum Guarded Hot-Plate for Measuring Thermal Conductivity and Total Hemispherical Emittance of Insulation Materials. *Insulation Materials: Testing and Application*, ASTM, STP 1426, 4. <https://doi.org/10.1520/STP11009S>
- [11] 张金涛, 邱萍, 段宇宁. 建立国家材料热物性测量标准装置的意义[J]. 中国计量, 2015(11): 53-55.
- [12] 郭一玲, 尹克廷, 黄丹桂, 姚隆卿. 激光脉冲法热物理性能的测定(低温部分)[J]. 稀有金属, 1980(6): 64-70.
- [13] 卫锦先. 激光脉冲法在低温导热吸收测试中的应用[J]. 宇航材料工艺, 1986(4): 27-33.
- [14] 何冠虎, 叶庆和, 邸忠起, 周本濂. 用激光脉冲加热-降温法测量比热(500~1200 K)[J]. 工程热物理学报, 1981, 2(3): 283-289.
- [15] 王补宣, 任泽霏. 利用“平板导热仪”测定热绝缘材料导热系数 α 的探讨[J]. 工程热物理学报, 1981, 2(3): 262-268.
- [16] 奚同庚, 徐秀兰, 倪鹤林, 等. 1200℃以下测定固体和液体的小平板热导仪的研究[J]. 工程热物理学报, 1981, 2(2): 181-184.
- [17] 奚同庚, 谢华清. 热物理性质测试技术研究现状与发展趋势[J]. 上海计量测试, 2002, 29(5): 7-12.
- [18] 尤清照, 魏丽坤. 激光脉冲法测定小试样比热的研究[J]. 钢铁研究总院学报, 1982, 2(1): 109-112.
- [19] 孟麦, 尤清照. 利用激光脉冲技术测量材料热物理性能[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(6): 46-49.
- [20] 何小瓦. 航天材料热物理性能测试技术的发展现状[C]//中国计量测试学会热物性专业委员会. 全国热物性测量学术会议: 2002年卷. 北京: 2002, 230-234.
- [21] 陈跃飞, 张金涛, 于帆, 等. 激光闪光法测量测量热扩散率国际比对的实验研究与分析[J]. 计量技术, 2008(12): 29-32.
- [22] 陈如冰, 吴向东. 导热系数测试仪校准方法研究[J]. 计量学报, 2007, 28(z1): 221-223.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org