

保护热板法导热系数测试研究综述

杨 雯, 王莹莹, 刘加平, 刘大龙

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 在热力学的基础上, 对目前国内外常用的保护热板法(GHPA)导热系数测试仪进行了分类和对比, 并对现行 GHPA 相关标准(中国、美国、欧洲)的适用范围和发展历程进行了对比介绍。以保护热板法的原理出发, 从试件条件、实验室环境条件、测试仪器条件和人员操作三个方面分析了对导热系数测量精度产生影响的因素及改进方法。

关键词: 导热系数; 保护热板法; 精度; 标准

中图分类号: TU111.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0057-08

A review on thermal conductivity by means of the guarded-hot-plate apparatus

YANG Wen, WANG Yingying, LIU Jiaping, Liu Dalong

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Techn., Xi'an 710055, China)

Abstract: On the basis of Thermodynamics, the thermal conductivity measurement methods (Steady-state method and transient method) and test equipment performance of high-profile company which product thermal conductivity tester (guarded-hot-plate apparatus) at home and abroad currently have been classified and contrasted. Starting from the principle of guarded-hot-plate, factors that impact on the measurement accuracy of the thermal conductivity and improvements are analyzed from three conditions, i. e. specimen, laboratory environmental, testing equipment conditions and personnel operation. Meanwhile, national standards of measurement of the thermal conductivity are introduced in brief forms.

Key words: thermal conductivity; guarded-hot-plate apparatus; accuracy; standards

导热系数在空间科学、食物材料和工程实践等领域均有重要作用^[1]。在建筑应用方面, 导热系数是鉴别材料保温性能好坏的重要指标, 是研究建筑热工与节能领域的重要参数, 精确地测量保温材料导热系数对正确使用建筑保温材料及节约建筑物的使用能耗起着关键作用。由于现今建筑材料的高速发展与多元化, 且不同材料的热性能差距较大, 因此使用单一的度量方法对所有材料进行热导率测量会造成不同程度的误差。目前热导率的测定方法已发展了多种, 它们有不同的适用领域、测量范围、精度、准确度和试样尺寸要求等, 不同方法对同一样品的测量结果可能会有较大的差别, 因此选择合适的测试方法至关重要。

导热是物质世界普遍存在的一个物理过程, 人们对导热系数的认识和研究有着悠久的历史, 1789 年, Ingen-Hausz^[2]首次建成了测试固体导热系数的稳态比较法实验装置。1851 年, Forbes^[3-6]

首次提出了测定导热系数的稳态绝对法。1898 年, Peirce 和 Willson^[7]首次提出了关于导热系数测试平板法的详细数学分析。1899 年, Lees 首次利用双试样系统研究了压力对热导率的影响。1912 年, Poensgen 采用的环形热保护加热器成为了现在有热保护的热板测试装置的原型^[8]。1970 年起, 伴随着能源危机出现后能源科学技术迅速发展的迫切需要, 人们对导热系数的测试和研究无论在广度或深度上都取得了重大进展。CINDAS 材料性能数据库(原 TPRC)陆续出版手册《Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series》^[9]。1973 年, Hahn^[10]建立数学模型确定了保护热板法计量和保护部分平均温度的计算方法。1982 年, Troussart^[11]使用有限元法, 建立了热电堆导线穿过保护热板法装置热板间隙时的热传导模型。1985 年, Hager 等^[12]提出在保护热板法装置(以下统称为 GHPA)中使用薄箔作为加热元件, 可以使

收稿日期: 2016-11-01

修改稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51590913); 国家自然科学基金青年项目(51508443)

第一作者: 杨 雯(1990—), 女, 博士生, 主要从事建筑技术方面的研究。E-mail: 489278194@qq.com

通讯作者: 刘加平(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑技术方面的研究。E-mail: 489278194@qq.com

导热系数值达到 $\pm 3\%$ 的精确度,且简单廉价的材料使装置非常适合用于产品开发和质量控制应用方面. Keltner^[13]和 Bainbridge^[14]分别在 1988 年和 1989 年确定了无限大矩形平板中心温度的数学表达式,并使用格林函数得到了解析解. 2001 年, Healy^[15]使用 ANSYS 模拟现有的 GHPA 中加热器和冷却液管的布局,以确定是否会在试件表面产生均匀的温度,并提出了新的 GHPA. 2009 年, J. Xamán 等^[16]提出了一个数学模型,以获得一个分析 GHPA 中心板和保护环内热传导的热微分方程解. 2011 年, Christian 等^[17]提出了一个使用多重线性回归分析的新的测试方法来预测两种不同样品的导热系数的值.

导热系数的测定方法分为稳态法和瞬态法两大类^[18]. 基于一维稳态原理,稳态法又可分为热流计法和 GHPA. 目前在国内, GHPA 多被用于航天材料导热系数的测定,研究人员多选择使用热流计法测量建筑材料绝热材料的导热系数. 热流计法是一种比较法,是用校正过的热流传感器测量通过样品的热流,得到的是导热系数绝对值. 然而 GHPA 才是目前绝对法中测量建筑和绝热材料导热系数应用最广且精度最高的方法,由于试样两侧的温度是稳定的, GHPA 的工作方程也比瞬态法简单许多. GHPA 中“保护”两字意指使用保护装置尽可能地消除试件边缘的热损失,保证传热的一维性. GHPA 几何结构简单,允许样品接近相变的临界状态,缺点是获得每个数据点的时间较长. 如表 1 所示,同样是测量建筑材料导热系数的稳态法,相比于 GHPA,热流法测试材料的导热系数范围和冷热板温度跨度均偏小,且误差大,故本文以 GHPA 作为主体展开研究.

表 1 热流计法与保护热板法测试性能对比
(以德国耐驰公司产品为例)

Tab. 1 Test performance comparison between heat flow meter & guarded-hot-plate apparatus

测试方法	热流计法	保护热板法
型号	HFM435 系列	GHP456 系列
冷热板温度/ $^{\circ}\text{C}$	四种型号分别为 0~40、0~100、 -30~90 和 -20~70	两种型号分别为 -160~250/600
导热系数 $/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.002~2	0~2
精确度	$\pm 1\% \sim 3\%$	$\pm 1\%$

本文从原理、仪器、标准和测试精度四个方面对 GHPA 进行了介绍分析,从了解原理到测试仪器的选择到参考标准的设定再到装置装配等,为从事建筑材料导热系数测定的科研人员对 GHPA 形成较为全面系统的了解奠定基础.

1 原理

GHPA 测试时热源位于同一材料的两块样品中间,使用两块样品是为了获得由热板向上与向下方向散出的全部热流,使加热器的热量被测试样品完全吸收^[19],图 1(a)为理想状态下装置试件处传热,图 1(b)为实际状态下加热板边缘热损失下的传热,消除热损失是提高 GHPA 精确度的重要环节.

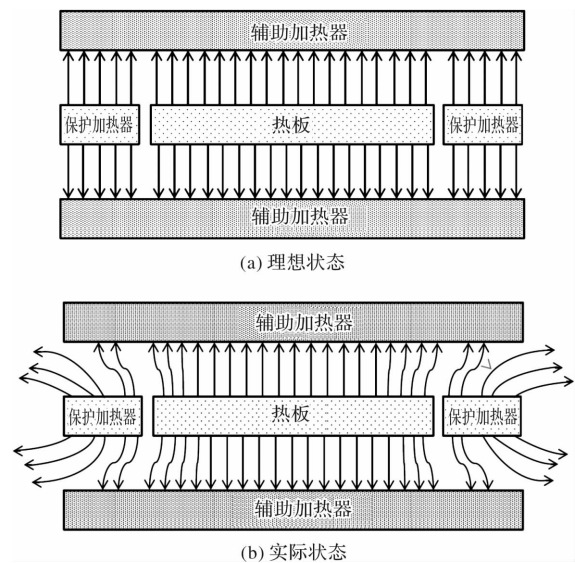


图 1 传热图

Fig. 1 Heat transfer

测量过程中,设定输入到热板上的能量.通过调整输入到辅助加热器上的热量,对热源与辅助板之间的测量温度和温度梯度进行调整.热板周围的保护加热器、绝热材料、样品的放置方式确保从热板到辅助加热器的热流是线性的、一维的.图 2 为 GHPA 导热系数测试仪原理图,仪器组件延中心平板对称布置,测试人员使用两个完全相同的样品,分别放置在主热板和上下两个辅助热板之间.冷热板起维持试件表面的边界条件常数(温度)的作用,仪器控制两个辅助热板在同一温度下,并保持主热板和保护热板处于更高的温度.保护热板围绕主热板,以减小侧面的热流量,外部的保护热板在高温和低温状态下能提供辅助性的隔热,通过样品的热流量相等于供给主热板的能量.依靠真空表加压空气和液氮系统降

低温度、旋转或涡轮泵系统创造不同测试环境，利用两侧炉创造冷热板周围的温度以消除径向热损失。理想状态下，冷热板应与试件完全接触，通过它们的热流必须是一维且独立的，从热板到冷板的热流沿 Z 轴方向，垂直于平板表面。导热系数由下列参数计算而得：每一样品的厚度与温度差、提供给主热板的能量、主热板的板面积。GHPA 的应用领域包括：纤维板、纤维片、疏松填充的玻璃纤维、矿棉、横长纤维、陶瓷纤维、泡沫塑料(PUR, EPS, XPS, polyimide)、粉末、泡沫(玻璃、橡胶)、真空绝热板(VIP)、多层复合板、石膏板、木材、纤维板、水泥、砂、土壤等。

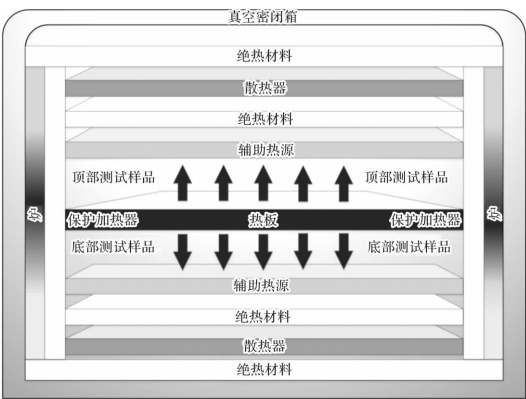


图 2 保护热板法导热系数测试仪原理图
Fig. 2 Schematic diagram of means of the guarded-hot-plate apparatus

2 保护热板法导热系数测试仪器

导热系数测试仪器的合理选择对提高导热系数测试的精度十分关键。目前中国国内引进 GH-PA 知名度较高的公司为中国湘潭湘怡仪器有限公司、美国 ITI 公司和德国耐驰公司，表 2 对这三个公司生产的 GHPA 进行了简单的对比。由表 2 可知，DRH 系列标准型号和 C-600-S、C-1200-S 固体热传导率测试仪只能设置室温及以上的温度进行测试，而 DRH 系列定制型号，虽然将测试温度最低值调整至零下，但相应的最高温度也降低至 60℃，温度跨度并无明显提高，故装置应用的广泛性也随之下降。DRH 系列，C-600-S、C-1200-S，GHP456 系列的测试样品均需要提前按照既定的尺寸制备，这样对有效控制试件边缘热损失、维持一维稳态传热等均有很大的帮助。C-600-S、C-1200-S 对试件尺寸的精确度多了一个数量级的要求，这在某种程度上会使试件制备的要求更为严格。另，从参考标准种类来看，GHP456 系列更具推广性。测试范围由宽到窄排序：GHP456、DRH、C-1200-S；测试准确度由高到低排序：GHP456、C-1200-S、DRH(准确度来自仪器生产厂家提供的报告说明、在此基础上对已使用该装置的用户进行了后期反馈调查加以修正)；价位由低到高排序：DRH、C-1200-S、GHP456。

表 2 导热系数测试仪(保护热板法)对比

Tab. 2 Comparison of the means of the guarded-hot-plate apparatus

公司名称	中国湘潭湘怡仪器有限公司	美国 ITI 公司	德国耐驰公司
仪器名称	DRH 系列	C-600-S、C-1200-S 固体热传导率测试仪	GHP456 系列
测试温度范围/℃	两个型号，分别为室温~150；0~60，(可根据用户要求选：-5~60，-30~60)	室温~100	两种型号，分别为-160~250/600
测试样品要求/mm	尺寸：100×100、200×200、300×300、600×600，厚度：5~50	两个型号，尺寸：152.4×152.4、304.8×304.8，厚度：12.7	尺寸：300×300，厚度：100
参考标准	国标	美标、国标	美标、国标、欧标等

3 现行标准

随着导热系数测量在工程热物理学、材料科学、计量测试学等科学领域的交叉中不断发展，各国均逐步形成了较为完整的 GHPA 测试体系并

发行了相关标准，由表 2 可知，不同仪器选用的参考标准不同，下面针对各国标准的适用范围等内容进行进一步说明。

3.1 适用范围

目前我国实行的保护热板法测导热系数的

标准为 GB/T 10294-2008^[20], 等同采用国际标准 ISO 8302-1991^[21]. ISO 8302 标准中规定试件的热阻不应小于 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 此时按照标准方法建立装置和操作, 当试验平均温度接近室温时, 测量传热性质的准确度能达到 $\pm 2\%$. 在装置设计时足够注意, 且经过广泛的检查并与别的类似装置相互参照测量后, 在装置的整个工作范围内, 应能达到大约 $\pm 5\%$ 的准确度. 若试件的热阻小于 $0.02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 则此精度无法满足. 标准中测试方法的应用范围, 受装置在试件中维持一维稳态均匀热流密度的能力和以要求的准确度测量功率、温度和尺寸的能力所限制. 亦受试件的形状、厚度和结构的均匀一致(当使用双试件装置时)、试件表面平整和平行度的限制.

美国实行 ASTM C177^[22] 标准, 以保护热板法为测试原理, 适用于不透明固体材料、多孔材料及透明材料等热传导率小于 $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的试件测试, 该方法适用于广泛的环境条件, 包括极端环境或不同气体和压力环境中的测试. 若检测试件在垂直于热流方向存在不均匀性(如层状结构), 可以用这个测试方法来评估. 但是, 若检测试件在热流方向存在不均匀性(如绝热系统的热桥部位), 则不应采用此方法进行测量.

欧洲标准 BS EN 12667-2001、BS EN 12664 和 BS EN 12939^[23-25] 分别适用于中高热阻建筑材料的热物性测试、中低热阻干湿建筑材料的热物性测试和中高热阻厚建筑材料的热物性测试, 均采用保护热板法或热流计法.

EN 12667 规定由于受接触热阻的影响, 试件的热阻不得小于 $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, EN 12664 规定试件无论是在干燥状态下或在潮湿空气中达到平衡状态, 热阻值均不得小于 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, (湿)透射率或导热系数不得超过 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (大部分砌筑试件的热阻预计为小于 $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). 两个标准的操作温度范围均为 $-100 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$. 均提供了设备性能和测试调价的附加限制和按照本标准规定要求设计的设备实例, 不提供通用设备的设计程序、设备故障分析、性能检查或设备准确性评估, 不提供总的指导和背景信息(如传热属性的报

告, 试件制备的产品依赖性), 多个测量程序(如评估试件非均匀性的影响, 超过装置能力的试件厚度的测试, 关于厚度影响相关性的评价). EN 12939 提供了超过 GHPA 和热流计法允许的试件厚度(不得超过 100 mm)的确定方法, 提供了评价厚度影响相关性的指导, 以确定厚试件的热阻是否可以以试件切割片的热阻总和来计算. 对 ISO 8302 中的相关内容起到了补充作用.

欧洲标准委员会颁布的技术规范 CEN/TS 15548-1-2014^[26], 该标准在 EN 12667 的基础上进行了补充, 测试温度范围变为 $-100 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$, 可大致分为 $-100 \text{ }^\circ\text{C} \sim \text{室温}$, $\text{室温} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上三种温度跨度形式. 由于在高温环境下进行测试, 此方法的精确度无法达到 ISO 8302 中规定的 $\pm 2\%$ (环境温度接近室温时的精度). 扩充温度范围是因为高温环境下温度测量的不确定性增加; 温度传感器在高温环境下操作时, 其性能会大大下降, 因此需要更为频繁的校准检查; 由于加热器的非均匀性, 平板上的热点增加, 故热点附近的传感器易提供虚假数据; 温度的升高导致了辐射热交换更为活跃, 需要增加对试样进行膨胀收缩问题的规定. 由于加热板的材料需要在较高的操作温度下保持其机械性能, 此技术规范要求加热板必须达到一定的厚度, 以保证平板上温度均匀分布, 但反过来, 加热板变厚又导致平板边缘的得热失热增加.

欧洲标准委员会颁布的技术报告 CEN/TR 15131-2006^[27] 补充了关于受厚度影响的中高热阻材料传热建模的技术资料, EN 12939 中用来测量较厚的中高热阻试件的程序中使用了内插公式进行计算, 此技术报告提供了其最低限制的背景资料. 所有用来评价较厚试件热性能的测试程序均要求效用, 本质上是根据包含了许多材料参数和测试条件的插值函数. 并不是所有材料的插值函数和材料参数都相同. 此技术报告还给出了从上述插值公式中得出的图表以评估一些绝热材料厚度影响的相关性.

3.2 发展历程

表 3 介绍了上述标准的发展历程, 对同系列标准新版对比旧版新增或更改内容进行了说明.

表 3 各国标准发展历程
Tab. 3 Development path of standards

国家	标准名称	发布日期	标准状态	新版相对于旧版变化内容
中国	GB/T10294-1988	1989-10-01	废止	首次发行，无变化。
	GB/T10294-2008	2009-04-01	现行	增加了引言； 增加了热均质材料、热各向同性体、试件的平均导热系数、试件的热传递系数、材料的表观导热系数、稳态传热性质、室内温度、操作者、数据使用者、装置设计者等定义； 增加了更为详细的符号和单位汇总表(见 1.4)； 增加了影响传热性质的因素(见 1.5.1)； 在原理中归纳了装置、构造和测试参数(见 1.6)； 归纳了由于装置产生的限制(见 1.7)； 归纳了由于试件产生的限制(见 1.8)； 增加了热电偶用于测量 21 K~170 K 的温度时，标准误差的限制(见 2.1.4.1.4)； 增加了热电偶的连接形式及其产生的测量误差(见 2.1.4.1.2)； 增加了厚度测量的详细方法(见 2.1.4.2)； 增加了对热电偶的连接方式的说明(见 2.1.4.1.2)； 增加了在设计流体冷却的金属板时应注意的问题(见 2.1.2)； 说明平整度测定的最小值为 25 μm (见 2.4.1)； 增加了测定与温差的关系(见 3.4.3)； 测定报告有所细化，如“对于在试件和装置面板间插入薄片材料或者使用了水汽密封袋的试验，在测定报告中应标明的参数(见 3.6.14)”； 增列了本标准阐述的装置性能和试验条件的极限数值(见附录 A)； 根据经验给出了对 E 型和 T 型热电偶建议的(专用级)误差极限(见表 B.1)； 增加了保护型热电偶的推荐使用温度上限(见表 B.2)； 实验室环境的条件发生变化，7.2.2 第二段中“ $293\pm 1\text{ K}$ ”改为“ $296\text{ K}\pm 1\text{ K}$ ”； 增加了附录 NA.
美国	ASTM C177-1997	1997-01-01	废止	首次发行，无变化。
	ASTM C177-2004	2004-01-01	废止	在介绍完参数含义后增加了讨论内容，大致介绍了保护热板法各元件的组成(见 3.3.27.1)
	ASTM C177-2010	2010-01-01	废止	若检测试件在热流方向存在不均匀性则参考 C1363 中测试方法测量(97 版参考标准为 C236、C976)(见 1.8) 参考文件里减少 C236、C976 标准，增加 C1363 标准； 增加说明：本标准不涉及除 SI 单位外的任何其他测量单位(见 1.14)；
	ASTM C177-2013	2013-01-01	现行	测试方法中增加说明：可以在装置中增加不止一个保护装置(见 4.1).
欧洲	BS EN 12664-2001	2001-03-15	现行	首次发行，无变化。
	BS EN 12667-2001	2001-03-15		
	BS EN 12939-2001	2001-01-15		
	CEN/TS 15548-1-2011	2011-02-15	废止	首次发行，无变化。
	CEN/TS 15548-1-2014	2014-08	现行	传感器的最小数量更改为 10 \sqrt{A} 或 2 (见 A4, 2.1.4.1.2)； 测定温差下限改为 20K，测定温差推荐下限改为 50K(见 A6, 1.7.3)； 通过试件的温差下限和上限分别改为 30K 和 70K(见 A6, 3.3.3).

4 如何提高测量精度

热导率是材料的固有属性,故热导率的大小从宏观上主要取决于材料的相、结构、化学组成、表面平整度等,从微观上主要取决于材料中水分子的含量、均匀性、各向同性、原子被包裹在晶格内的紧密度等。我们将上述材料性质归结为试件条件,除了试件条件,实验室环境条件、测试仪器条件和人员操作均会在测量过程中带来不同程度的误差,对热导率的测量精度产生影响。

4.1 试件条件

4.1.1 均匀性、各向同性

保护热板法测量热导率时使用的试件必须是均质的,这是因为在测量非均质试件热阻或热导率时,试件内部和计量区域表面的热流密度可能既非单向又不均匀,试件中会存在热场变形,且若试件虽然是均匀的,但是各向异性(即试件内平行于试件表面方向测定的导热系数分量与垂直于表面的方向测定的导热系数分量不同),导致严重误差(边缘热损失误差和不平衡误差等),从而使试件中的热流等背离一维稳态传热模式,且这种变化是不可准确预测的,大部分的误差计算时均会限制简化的边界条件,假定试件为辐射的不透明体,故如果试件为半透明体,也会使误差计算不准确。要想减少上述误差,需对试件进行均质性评估并对试件的边缘部分做好绝热措施。

4.1.2 厚度

在防护热板法测试中,确定绝热材料的厚度具有重要意义。由于受室内热环境的影响,如热可逆膨胀、收缩或热不可逆膨胀、收缩,试件的厚度会产生细微变化,从而引起热传导过程的变化。放置在设备中的试件厚度决定了材料的密度以及在测试热物性时的温度梯度。由于传递系数与试件厚度有关,所以不满足导热系数和热阻系数(两者都是材料的固有特性)定义的要求。对于这些材料,可能希望测定应用条件下的热阻,可以相信所有材料都有一个热传递系数与厚度有关的厚度下限。低于此厚度时,试件可能有独特的传热性质,但不是材料的性质。

ISO8302中规定试件的厚度应大于当厚度进一步增加时材料、产品或系统的传递系数变化不大于2%时的厚度。试件越薄、密度越小,热阻与传导以外的传热过程越有关系。试件的最小厚度受试件与热板、冷板之间接触热阻的限制,最大厚度受试件边缘的边界条件制约。测量试件厚度方

法的准确度应小于0.5%。建议尽可能在装置里、在实际的测定温度和压力下测量试件厚度。可用装在冷板四角或边缘的中心的垂直于板面的测量针或测微螺栓测量试件厚度。有效厚度由试件在装置内和不在装置内时(冷板用相同的力相对紧压)测得距离的差值的平均值确定。ASTM C177则建议在测试热传递性前后均对试件厚度进行测量,测试试件厚度的建议过程是测量安装在装置时的厚度,并且在附件中用大量的篇幅介绍了如何测量厚度、厚度的限制以及可能产生的误差。

4.1.3 其他

另外,若采用双试件装置测量,应使两试件尽可能地相同,减少温差的差别,从而减少不对称条件引起的误差。试件的制备和状态调节应按照被测材料的产品标准进行,参考GB-T 15000《标准样品工作导则》^[28],对已经制备好的试件应给予合理的处置和贮存,如加以标识、维护和隔离,必要时,可采用避光、抽真空、防潮或充惰性气体包装,防止外界环境使试件性质发生改变。

4.2 仪器条件

在前文对现有的保护热板法热导率测试仪的性能情况大致介绍了的基础上,如何进一步对一个新入或改进过的保护热板装置进行各项性能检测校核?或者说,在设计装配装置中还应考虑哪些因素以提高整个测试系统的准确性。

4.2.1 系统内温度控制

温度是影响热导率的一个关键性因素。GB 10294规范中对系统内的温度测量已经有了比较详细规定,例如如何进行温度不平衡度的检测、利用永久性埋设在面板沟槽内或放在与试件接触的表面下的温度传感器测量表面温度、温度传感器的位置与安装方法等等。同时,也论述了温度测量系统的校准方法:把装有试件的防护热板组件密封于空气调节箱内,调节冷却单元的温度为其使用范围内某一适当值,把箱体内部的环境温度控制到同一温度值,不向加热单元的计量加热器和防护加热器施加电功率,此时加热单元的温度必须与冷却单元温度一致,差异应在测量系统的噪声范围内。

笔者认为,在满足上述条件外,还可采用以下措施控制温度:

具有超低热膨胀系数的绝热材料以提高装置内的温度稳定性。由于受到室内热环境的影响,如热可逆膨胀、收缩或热不可逆膨胀、收缩,试件的物性会产生细微变化,从而引起热传导过程

的变化, 极低的热膨胀系数, 可以使这种变化引起的误差量级降低。

目前的热导率测量仪更多地采用被动措施控温, 但如果加入主动措施(反馈控制系统主动补偿温度的变化)将会大大提高仪器的温控精度, 将其温度的长期波动降低。首先需要温度参考(高稳定性、波动低), 通过测量温度与参考温度对比来获得测温误差信号, 然后再通过反馈来校正温度。

4.2.2 湿度控制

由于试件的干燥度是影响热导率的关键因素之一, 且目前国际上最常使用的 ASTM 标件玻璃棉对湿度控制有很高的要求, 故笔者认为即使在装置内较难引起标件湿度变化, 也应在使用了标准试件的同时, 对装置系统内的湿度进行控制, 避免传湿过程的变化不确定性和不可控性对测量结果造成误差。

4.2.3 振动控制

20 世纪人们就认识到了振动会通过对传热介质周围的边界层形成强烈的扰动等方式影响传热效果。笔者认为, 为了减少热阻与传导以外的传热过程的关系, 在导热率测试仪本身未考虑防振的情况下, 为了提高测试精度, 可选择性设置被动振动隔离系统, 利用机械阻尼结构的振动特性来减少振动。目前的商用的被动隔振平台已经在尺寸和重量上降低了很多, 但一般其自然频率大约在 1 Hz 左右, 只能对高于 1 Hz 的振动进行衰减。如若需要更为精密的振动调控, 也可使用主动隔振技术, 利用机电反馈控制技术来主动补偿传感器所检测到的振动, 或通过合理设计设备内部几何形状和支撑方式来降低对振动的敏感度。如若装置本身体量较大, 可以在一定程度上防震, 也应考虑体量过大带来的搬运及后期维护问题, 如何在尽可能减少装置体量的同时隔振, 是待解决的问题。

4.2.4 其他

除了上述提到的控制因素外, 还应对工作表面的平整度和热辐射率定期进行测量检查, 如 GB 10294 中就规定了在任何操作条件下, 平整度应优于 0.025%, 且加热单元和冷却单元面板均不应与试件及环境发生化学反应, 如图 2 中, 假定一个理想平面与板的表面在 P 点接触, 表面上任何其他点 B 与理想平面的距离 AB 与 A 点到参考接触点 P 的距离 AP 之比应小于 0.025/100; 合理设置电气测量系统, 电气测量系统与加热器的设计、使用的测温传感器和温差传感线路有关, 这些线路的输出范围

随装置的工作范围变化, 很可能变化达几个数量级, 需选择高线性、宽量程或低线性、多量程的测量仪器对电气系统进行控制; 合理控制装置内部热噪声; 增加外方护套或先行温度梯度的防护套以限制防护部分及试件外边缘热损失等等。

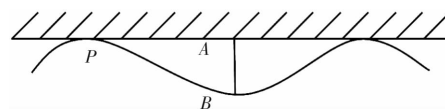


图 6 表面偏离真实平面

Fig. 6 Extent of the work surface departing from ideal plane

4.3 实验室环境条件与人员操作

目前的研究结果表明, 保护热板法热导率测试对实验室环境并未有严格的要求, 这是因为为了满足一维稳态传热, 装置仪器使用绝热材料等将整个测试部分与实验室环境隔离开, 形成了完全封闭的空间, 在封闭的空间内部由装置自动调节控制各环境参数。实验室环境条件与人员操作要求可参考 ISO/IEC 17025: 2005《检测和校准实验室能力的通用要求》。对诸如生物消毒、灰尘、电磁干扰、辐射、湿度、供电、温度、声级和振级等应予以重视, 并具有安全处置、运输、存放、使用和有计划维护测量设备的程序, 确保所有操作专门设备、从事检测和校准人员的能力, 减少人员操作误差。

5 总结与展望

基于一维稳态原理, GHPA 测量导热率精准度最高, 但价格昂贵, 这也是大多数科研人员不选用它作为建筑和绝热材料导热系数测定装置的主要原因, 如何在保证测试精度的基础上增加 GHPA 的推广性还有待研究; 现行 GHPA 相关标准(中国、美国、欧洲)的内容并无太大差别, 具体细节略有不同; 要想进一步提高保护热板法热导率测量精度, 必须从试件条件、仪器条件、实验室环境条件和人员操作三个方面考虑, 且目前国内大多引进 NIST 和 NPL 生产的标件进行标定测量, 国内在研制我国统一的可溯源性材料导热系数标准试件等问题上还存在很大的进步空间。

参考文献 References

- [1] PATEL Romil, PATEL Chintan, PATEL Pratik. A review paper on measure thermal conductivity[J]. JE-TIR, 2016, 2(3): 51-53.
- [2] INGEN Hausz. On metals as conductors of heat[J]. J.

- de Physique, 1789, 34(68), 380-387.
- [3] FORBES J D. On the progress of Experiments on the Conduction of Heat, undertaken at the Meeting of the British Association at Edinburgh, in 1850 [J]. Brit. Assoc. Adv. Sci., 1851, 21:7-8.
 - [4] FORBES J D. On Experiments on the Laws of the Conduction of Heat [J]. Brit. Assoc. Adv. Sci., 1852, 22: 260-261.
 - [5] FORBES J D. Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars, and into the Conducting Power of Wrought Iron [J]. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, 1864, 23: 133-146.
 - [6] FORBES J D. Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars. Part II. On the Conductivity of Wrought Iron, Deduced from the Experiments of 1851 [J]. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, 1865, 24:73-110.
 - [7] PEIRCE B O, WILLSON R W. On the thermal conductivities of certain poor conductors; I [J]. Proc. Am. Acad. Arts and Sci, 1898, 34(1): 1-56.
 - [8] 杜洛金, 奚同庚, 等. 固体热物理性质导论:理论和测量[M]. 北京:中国计量出版社, 1987.
DU Luojin, XI Tonggeng, et al. Introduction to solid thermophysical properties: theory and measurement [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1987.
 - [9] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, et al. Thermophysical Properties of Matter-The TPRC Data Series. Volume 10. Thermal Diffusivity [R]. Fort Belvoir:TEP/AC, 1974.
 - [10] HAHN M, ROBINSON H, FLYNN D. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus [C]. Symposium by ASTM Committee C-16 on Thermal and Cryogenic Insulating Materials, Philadelphia: ASTM International, 1973:167-192.
 - [11] TROUSSART L R, Analysis of errors in guarded hot plate measurements as compiled by the finite element methods[C]. Symposium by ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation, Quebec:ASTM International, 1982:7-28.
 - [12] HAGER N E. Recent developments with the thin-heater thermal conductivity apparatus[J]. Journal of Building Physics, 1985, 9(2): 111-122.
 - [13] KELTNER N, BAINBRIDGE B, BECK J. Rectangular heat source on a semi-infinite solid: an analysis for a thin film heat flux gage calibration[J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110: 42-48.
 - [14] BAINBRIDGE B. A Green's function solution for a rectangular heat source on an infinite plate[J]. National Heat Transfer Conference, 1989, 112: 23-30.
 - [15] HEALY W. Using finite element analysis to design a new guarded hot plate apparatus for measuring the thermal conductivity of insulating materials[J]. National Institute Standards Technology, 2001, 1:1-9.
 - [16] XAMÁN J, LIRE L, ARCE J. Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(4): 617-623.
 - [17] SANJAYA C S, WEE T H, TAMILSELVAN T. Regression analysis estimation of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(10): 1566-1575.
 - [18] BUCK W, RUDTSCH S. Handbook of materials measurement methods [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 40(9): 399-429.
 - [19] SALMON D. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(12): 89.
 - [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法: GB/T 10294-2008 [S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Thermal insulation—Determination of steady-state thermal resistance and related properties: guarded hot plate apparatus: GB/T 10294-2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
 - [21] ISO. Thermal insulation; determination of steady-state thermal resistance and related properties; guarded hot plate apparatus: ISO 8302-1991 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1991.
 - [22] ASTM. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus: ASTM C177[S]. Philadelphia:ASTM, 2013.
 - [23] BSI. Thermal performance of building materials and products- determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-products of high and medium thermal resistance: BS EN 12667 [S]. London: BSI British Standards, 2001.
 - [24] BSI. Thermal performance of building materials and products determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods dry and moist products of medium and low thermal resistance: BS EN 12664[S]. London: BSI British Standards, 2001.
 - [25] BSI. Thermal performance of building materials and products-Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-Thick products of high and medium thermal resistance: BS EN 12664 [S]. London: BSI British Standards, 2001.
 - [26] BSI. Thermal insulation products for building equipment and industrial installations-Determination of thermal resistance by means of the guarded hot plate method Part 1: Measurements at elevated temperatures from 100 °C to 850 °C: CEN/TS 15548-1-2014 [S]. London: British Standards Institution, 2014.
 - [27] BSI. Thermal performance of building materials-The use of interpolating equations in relation to thermal measurement on thick specimens-Guarded hot plate and heat flow meter apparatus: CEN/TR 15131-2006 [S]. London: British Standards Institution, 2006.
 - [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 标准样品工作导则: GB/T 15000 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Directives for the work of reference materials: GB/T 15000 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.

(编辑 桂智刚)