



TCi方法测试理论假设引入测量误差数值分析

马奕新¹, 张虎^{1*}, 王娟¹, 唐桂华²

1. 西安交通大学航天航空学院, 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: huzhang@xjtu.edu.cn

2019-10-09 收稿, 2019-11-10 修回, 2019-11-11 接受, 2019-11-13 网络版发表

国家自然科学基金(51606143, 51825604)、博士后创新人才支持计划(20180244)、中国博士后科学基金(2018M643641)和中央高校基本科研业务费(xjj2018029)资助

摘要 飞行器热防护与节能保温等领域均需使用高效的隔热材料. 导热系数作为表征材料隔热性能的重要参数, 其准确测试具有重要意义. 修正瞬态平面热源法(modified transient plane source method, MTPS)又称TCi方法, 是在瞬态平面热源法的基础上发展起来的一种瞬态导热系数测试方法, 因其具有单面测试、测试速率快、便于进行现场测试等优点而得到了较多应用. 但其声称测试精度适用范围有待验证, 不同方法对比或者相同方法不同测量方式均会出现较大的测试偏差. 本文通过数值手段模拟TCi方法的实验测试过程, 定量分析并揭示其测量理论假设对泡沫类、陶瓷类和金属类材料导热系数和蓄热系数测试精度的影响规律. 结果表明, TCi方法可以比较准确地测试不同类型材料的蓄热系数, 不同校准曲线对蓄热系数测试结果影响不大, 但不同导热系数校准曲线所得结果差异较大, 尤其是泡沫类材料, 受探头隔热层影响非常显著, 会使测试结果出现较大偏差. 探头与测试材料之间的接触热阻会使高导热材料测试结果偏低, 而对低导热泡沫类材料的影响可以忽略, 添加接触剂可以显著降低接触热阻的影响. TCi方法理论假设中校准曲线及接触热阻均会对测试精度产生影响, 这些误差累积后可能会显著影响测试精度. 因此, 使用TCi方法时需对其理论假设引入的误差予以分析.

关键词 导热系数, TCi方法, 蓄热系数, 理论假设, 测量误差, 数值模拟

导热系数是热防护材料、隔热保温材料等不同热调控功能材料最重要的热物性参数之一^[1], 其准确测试对节能减排、传热强化以及设备系统安全等均具有重要意义. 导热系数测量方法可以分为稳态法和非稳态法两类. 热流计法、防护热板法等稳态法基于一维傅里叶导热定律, 而非稳态法(如激光闪射法、瞬态热线/热带法、瞬态平面热源法和修正瞬态平面热源法)基于非稳态的导热微分方程. 与稳态方法相比, 非稳态方法因具有测试时间短、样本尺寸小、测试范围大、成本低等优点而得到了广泛应用^[2].

在众多瞬态测试方法中, TCi方法是21世纪初在瞬

态平面热源法基础上发展而来的一种瞬态导热系数测试方法^[3], 又称修正瞬态平面热源法. TCi方法具有测试简单、迅速、经济等显著优势, 因其采用单面材料测试, 更容易进行现场测量, 近年来逐渐应用于测试建筑材料及气凝胶等隔热材料的导热系数^[4-8], 在分析复合材料、流体和粉末的导热性能中也得到了较多应用^[9-12]. C-Therm公司TCi仪器的导热系数测试范围为 $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$, 标称精度在 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内为5%, 在此温度范围之外为10%, 但其声称精度缺乏必要的考核验证, 而且针对个别材料的精度校核并不适用于所有材料^[13]. 这就难以解释相同材料、相同测试方法、不同

引用格式: 马奕新, 张虎, 王娟, 等. TCi方法测试理论假设引入测量误差数值分析. 科学通报, 2020, 65: 740-749

Ma Y X, Zhang H, Wang X, et al. A numerical study of the measurement error introduced by TCi theoretical assumptions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 740-749, doi: [10.1360/TB-2019-0607](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0607)

校核方法测量结果出现巨大差异的原因。例如, 项永亮等人^[14]研究发现, 采用TCi方法测试Pyrex耐热玻璃的导热系数时, 选择校准方式分别为高分子聚合物或陶瓷类均可得到测试结果, 但两者差别达到14%; 而对LAF6720泡沫选用校准方式为泡沫类或流体类和粉末类均可获得结果, 但后者测量结果比参考值偏高35%。Mikulić和Milovanović^[15]将TCi方法测得的几种隔热材料导热系数与材料厂商提供的数值对比发现, 偏差在15%~35%, 与文献值也有较大差异。Cha等人^[16]发现, 热流计法和激光闪射法测得的某些材料导热系数值与TCi测试结果有显著差异, 且TCi测得部分隔热材料的导热系数值低于空气的值, 与实际结果差异较大。因此, 有必要分析引起上述相同材料不同测量方法、相同测量方法不同测量模式测得结果存在较大偏差的主要原因, 为实施准确测量提供分析支撑依据。

非稳态测试的不确定性主要来自两个方面: 输入/输出参数的测量误差和测试方法理论假设引入的误差。前者可以通过采用高精度、高分辨率的测试设备进行改进, 通常可用误差传递函数来估计, 而理论假设带来的不确定性很难定量确定且容易被忽略。不同测量方法均基于一定的理论假设^[17], 能否准确测试取决于假设能否充分满足, 如瞬态平面热源法测试相同隔热材料时, 采用不同厚度探头测试结果差异过大的主要原因为偏离了平面热源假设^[18]。此外, 接触热阻也是影响热物性测量的一个重要因素, 如测量材料接触界面之间、探头与材料接触面之间的接触热阻会影响材料温度分布及动态温度响应测量结果, 进而会影响测试结果的可靠性^[19,20]。

对于TCi方法, 理论假设可能从以下3个方面引入误差: 一是TCi测试理论本身; 二是材料的校准曲线; 三是探头与材料之间的界面热阻。理论假设引入的误差不能通过实验测试或理论分析直接得到。因此, 本文通过数值方法模拟TCi方法的动态测试传热过程, 根据加热丝的温升曲线结合测量理论及校准参数计算被测材料的导热系数和蓄热系数, 通过比较计算值和模拟给定值之间的差异, 即可定量揭示理论假设对TCi方法测量材料导热系数和蓄热系数精度的影响。

1 TCi方法测试原理

TCi方法使用双螺旋探头为被测材料提供一个瞬态的热源, 经过一次测试及标定即可同时获得材料的导热系数和蓄热系数。测试探头由双螺旋加热丝、隔

热层、封接玻璃、保护环和外壳等组成。探头既是加热源, 又是温度传感器, 图1为探头及其结构示意图。测试时, 探头与材料单面接触, 加热丝发出的热量绝大部分传递给被测材料, 极少部分热量被探头背部隔热层吸收。为满足这一条件, 在探头背面设置一层泡沫类材料作为隔热层, 阻止加热时热量向探头背面传递, 并且在探头加热丝外侧增加辅助加热器(保护环)来消除探头径向散热的影响。通过探头与被测材料接触面的温升计算得到被测材料的导热系数与蓄热系数。

被测材料内部的传热过程可简化为一维、非稳态、有内热源的传热问题, 即

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q}, \quad (1)$$

式中, λ , ρ , c_p 分别为探头或被测材料的导热系数($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)、密度(kg m^{-3})和比定压热容($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); T 为温度($^{\circ}\text{C}$); t 为时间(s); $\dot{Q}$ 为内热源(W m^{-3}), 代表加热丝单位体积发热功率。

假设两块半无限大介质接触面以恒定功率加热, 探头一侧假设为等效介质(探头加热丝+隔热层+封接玻璃等), 另一侧为测试材料, 截面处温度相同, 式(1)的解^[21]为

$$\begin{aligned} \Delta T_1(x, t) &= \frac{2Q\sqrt{t}}{e_1 + e_2} \text{ierfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_1 t}}, \\ (\text{探头侧 } x < 0, t > 0), \\ \Delta T_2(x, t) &= \frac{2Q\sqrt{t}}{e_1 + e_2} \text{ierfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2 t}}, \\ (\text{被测材料侧 } x \geq 0, t > 0), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ierfc表示高斯误差函数; ΔT 为探头表面温升($^{\circ}\text{C}$); Q 为探头加热的热流密度(W m^{-2}); a_1 , a_2 分别为探头和被测材料的热扩散系数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), 其物理意义是表征物体

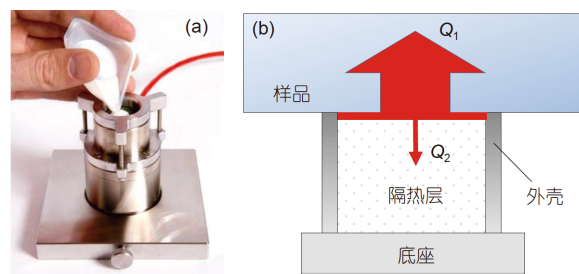


图1 (网络版彩色)探头及其结构示意图。(a)实物图;(b)结构示意图
Figure 1 (Color online) The sensor and its structure. (a) The real sensor; (b) structure diagram

内部温度趋于均匀化的能力; e_1 , e_2 分别为探头和被测材料的等效蓄热系数($e=(\lambda\rho c_p)^{0.5}$, 即材料导热系数、密度与比定压热容乘积的平方根, $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$), 其物理意义是表示物体吸热的能力, 也叫吸热系数.

测试前, 探头和被测材料温度保持均匀稳定. 假设探头和被测材料接触面不存在接触热阻, 则接触面上 $\Delta T_1(x=0, t)=\Delta T_2(x=0, t)$, 由式(2)可得

$$\Delta T(0, t) = 0.5642 \times \frac{2Q\sqrt{t}}{e_1 + e_2} = \frac{1.1284Q\sqrt{t}}{e_1 + e_2}. \quad (3)$$

温升通过测试已知电阻温度系数的探头加热丝的电阻变化得到, 即

$$\Delta R(t) = R(t) - R(0) = \alpha R(0) \Delta T(0, t) = A \Delta T(0, t), \quad (4)$$

其中, $R(0)$ 是加热丝开始加热时的电阻(Ω); $R(t)$ 是加热丝在 t 时刻的电阻(Ω); α 是电阻温度系数(K^{-1}); A 是电阻随温度变化的斜率(ΩK^{-1}).

加热时, 给探头加热丝施加恒定的电流, 则加热丝两端的电压变化为

$$\begin{aligned} \Delta V(t) &= I \Delta R(t) = I A \Delta T(0, t) \\ &= \frac{1.1284 I A Q \sqrt{t}}{e_1 + e_2} = m \sqrt{t}. \end{aligned} \quad (5)$$

通过测量 $\Delta V(t) - t^{1/2}$, 线性拟合得到斜率 m , 校准后计算出被测材料的蓄热系数:

$$\frac{1}{m} = \frac{e_1 + e_2}{1.1284 I A Q} = M e_2 + C = M_2 e_2^2 + M_1 e_2 + C, \quad (6)$$

其中, M, M_1, M_2, C 为探头的固有系数. 对于高导热材料(如金属等), 热流会向四周传递而导致一维传热假设不成立, 因此采用式(6)中右侧的二次多项式拟合求解其蓄热系数.

材料的导热系数通过标定3种及以上不同已知物性参数的同类型(低导、高导、中等导热)材料迭代回归计算所得的校准参数 m^* 、斜率 a 和截距 z 进行求解, 拟合关系满足下式^[3]:

$$\frac{1}{m - m^*} = a \lambda + z. \quad (7)$$

2 TCi方法测试精度分析思路

针对TCi方法中理论模型假设、校准曲线及接触热阻等误差来源, 通过图2所示的研究思路进行精度分析, 即通过数值模拟实际实验的传热过程, 分析实验中以上因素对测试精度的影响大小. 具体实施步骤如下:

(1) 在模拟中给定与实际测试探头(包含加热丝、

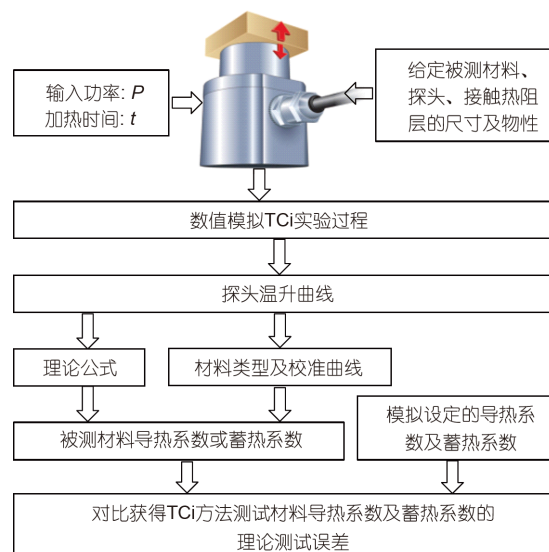


图2 (网络版彩色)TCi方法理论测试精度分析思路

Figure 2 (Color online) Theoretical test accuracy analysis of TCi method

隔热层、封接玻璃等)一致的几何参数和物性参数. 给探头和保护环输入一定的加热功率及加热时间, 模拟TCi方法测试的动态传热过程, 通过统计探头加热丝的平均温度响应获得被测材料的温升响应曲线.

(2) 选取3种及以上已知物性参数的材料进行模拟分析, 由温升曲线及TCi方法理论计算公式拟合得到相应的导热系数和蓄热系数校准曲线. 用校准曲线校准计算其他材料的蓄热系数及导热系数, 分别得到不同校准曲线下的结果. 由于材料导热系数和蓄热系数的范围很广, 不同材料之间会存在交集, 因此需要对材料加以分类, 每类材料都有相应的校准曲线. 材料分类及其属性如表1所示^[21].

(3) 考虑探头和被测材料之间存在一定厚度的薄层, 通过改变薄层的热物性来考虑接触热阻及接触剂

表1 材料分类及其属性

Table 1 Material groups and their attributes

材料分类	蓄热系数范围 ($\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	导热系数范围 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
流体和粉末类	0~1660	0~0.61
泡沫类	50~290	0.04~0.12
聚合物类	570~1450	0.13~1.2
陶瓷类	1400~8600	1.1~29
低导金属类	7500~17000	15~90
高导金属类	16500~38000	85~500

存在情况下被测材料导热系数和蓄热系数的结果。

(4) 比较不同校准曲线及接触热阻下蓄热系数和导热系数的计算值与模拟设定值, 两者之差即为理论模型假设、校准曲线及接触热阻等因素引入的测量误差。

3 数值模拟方法

3.1 计算区域与边界条件

TCi方法的测试探头由加热丝、隔热层、封接玻璃和保护环等组成, 探头为圆柱体形状。为简化计算, 模拟中选用被测材料的形状与探头同为圆柱体, 则被测材料和探头沿中心线轴对称。双螺旋加热丝可等效为一系列等间距的圆环, 因此可将三维传热问题简化为二维轴对称传热问题。简化的探头和计算区域示意图如图3所示, 计算区域下侧为轴对称边界条件, 其余边界为绝热边界。模拟中探头及被测材料的几何参数如表2所示。简化探头由加热丝、保护环、氧化铝基板、隔热层和封装玻璃组成。加热丝和保护环的材料为铂, 密度为 21450 kg m^{-3} , 比定压热容为 $133 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 导热系数为 $71.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 模拟时相邻加热丝的间距为 0.5 mm , 加热环数为10, 最外环半径为 7.6 mm 。隔热层为绝热性能良好的发泡材料, 其密度为 35 kg m^{-3} , 比定压热容为 $1900 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 导热系数为 $0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。封接玻璃为耐高温的微晶玻璃, 密度为 2500 kg m^{-3} , 比定压热容为 $800 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 导热系数为 $4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

3.2 控制方程及数值计算方法

二维轴对称非稳态传热问题的能量方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}. \quad (8)$$

非稳态项采用一阶隐式格式, 扩散项采用中心差分, 计算初始温度均为 25°C 。模拟时, 统计得到探头加热源的平均温度随时间的变化, 热源温度为体积平均结果。由于模型中涉及的几何尺寸跨越多个数量级, 加热丝厚度在微米尺度, 材料尺寸在厘米尺度, 为了能够区分每个加热微元, 采用非均匀网格, 经网格独立性考核后使用的网格数为177630。

模拟时探头温度变化可以直接得到, 不需要将其转化成对应的电阻进行计算。本文在模拟中将式(3)变成类似式(6)的形式计算蓄热系数, 即

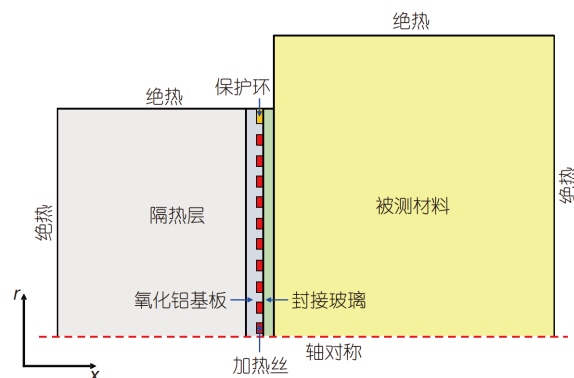


图3 (网络版彩色)计算区域示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of computation domain

表2 模拟探头几何参数^{a)}

Table 2 Geometric parameters of the simulated sensor

名称	厚度(mm)	半径(mm)	宽度(mm)
探头	15	9	/
加热丝(铂)	0.005	/	0.3
封接玻璃	0.02	9	/
氧化铝基板	0.01	9	/
保护环	0.005	/	0.5
被测材料	20	15	/

a) /表示无数值

$$\frac{1}{m} = \frac{e_1 + e_2}{1.1284Q} = Me_2 + C = M_2e_2^2 + M_1e_2 + C, \quad (9)$$

式中, m 为 $\Delta T-t^{1/2}$ 关系的斜率, 模拟中导热系数计算公式(7)的斜率 m 与此相同。

实际加热过程中, 探头背部的隔热层会吸收少部分热量。为了补偿这部分损失的热量, 需要对测试结果进行校准, 即对一块导热系数无限大(零热阻)的材料进行测试, 得到探头温度和时间关系曲线的斜率 m^* , 作为导热系数计算的校准系数。由于实际中不存在零热阻的材料, 因此校准参数 m^* 需要通过数学迭代和线性回归的方法得到^[4], 校准过程如图4所示。在每类材料范围内选取3种及以上已知导热系数的材料进行模拟分析, 根据温升响应计算斜率 m 。校准参数 m^* 可以表示为迭代变量 f 和加热功率 P 的乘积, 将其代入式(7)进行线性回归分析。在线性回归分析中, 不断调整迭代变量 f 的值进行迭代优化。当 $R^2 \leq 0.9$ 时, 每次迭代 f 减小1%; 当 $0.9 < R^2 \leq 0.9995$, f 减小0.05%; 当 $R^2 > 0.9995$ 时, 迭代完成, 记录此时 m^* 的值。

4 结果与讨论

4.1 数据处理过程

测试刚开始的一段时间, 探头热惯性和接触热阻影响较大, 影响温升曲线的拟合线性度; 时间过长后, 探头发出的热量会传递到材料表面, 偏离半无限大材料假设, 因此需要选择合适的测量时间范围. 对此, TCi 用户手册推荐了不同类型材料测试的时间范围, 泡沫类材料是1.2~2.7 s, 其他材料均是0.5~1.0 s^[21]. 模拟过程中, 针对不同类型的材料, 调节加热丝和保护环的输入功率, 使探头温升在1~5°C范围内. 加热过程中, 保持两者最终温度相同, 以满足热流沿一维方向传递给被测材料这一理论假设. 图5为模拟的温升拟合过程. 刚开始加热时, 由于探头热容及热惯性的影响, 温升曲线线性度较低, 因此需要选取之后线性段的数据进行斜率拟合, 如图5箭头标出的部分. 根据TCi方法的测试理论, 斜率拟合时采用温度随时间平方根的数据, 拟合的线性相关指数 $R^2 > 0.999$.

4.2 校准曲线的影响

TCi方法和传统瞬态方法最大的区别就是它采用了一种比较的方法, 即通过对多种已知物性参数的材料进行测试, 根据温升(电压)曲线拟合所得斜率与导热系数和蓄热系数建立一种对应关系, 即校准曲线. 采用校准曲线校准计算其他未知物性参数材料的导热系数及蓄热系数. 图6和7是对从表1泡沫类和金属类材料范围内选取的一组材料进行模拟分析后拟合得到的校准曲线, 其中导热系数的校准系数 m^* 通过图4所示的校准过程, 编写Matlab程序进行迭代回归计算所得. 可以发现, 泡沫类材料导热系数和蓄热系数的校准曲线以及金属类材料导热系数校准曲线均为一次线性拟合获得, 而金属类材料蓄热系数校准曲线为二次拟合求得, 拟合相关性均较好.

校准曲线通过选取一组(3种以上)已知物性参数的标准试样进行测试拟合求得, 选择不同的试样会产生不同的校准曲线. 为分析不同校准曲线的影响, 在表1所给的范围内, 分别在泡沫类、陶瓷类和金属类材料中选取3组物性参数各不相同的材料拟合得到3种不同的校准曲线. 在每类材料中选取与前面3组材料物性参数都不相同的一组(第4组)材料进行模拟分析, 采用3种不同的校准曲线校准计算第4组材料的蓄热系数和导热系数, 通过对比不同校准曲线校准计算值与模拟给

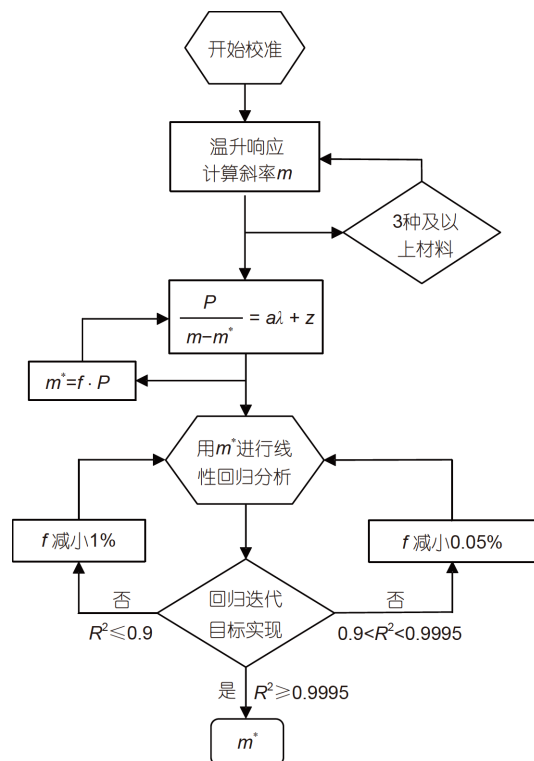


图4 校准过程流程图
Figure 4 Flowchart of calibration process

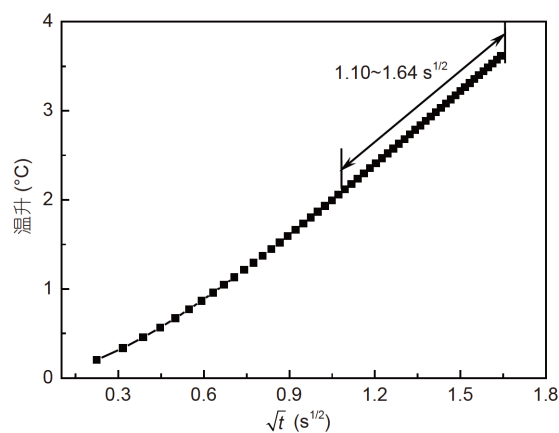


图5 温升拟合过程
Figure 5 Fitting process of temperature rise

定值的差别来分析校准曲线对测试结果的影响. 每类材料所选4组材料的物性参数详见表S1. 图8为不同校准曲线对蓄热系数的影响, 实线代表模拟给定的蓄热系数值, 其余点为不同校准曲线校准获得的计算值. 可以发现, 对于泡沫类材料, 3种不同校准曲线获得的蓄热系数值与模拟给定值相差不大, 最大偏差为2.2%(图

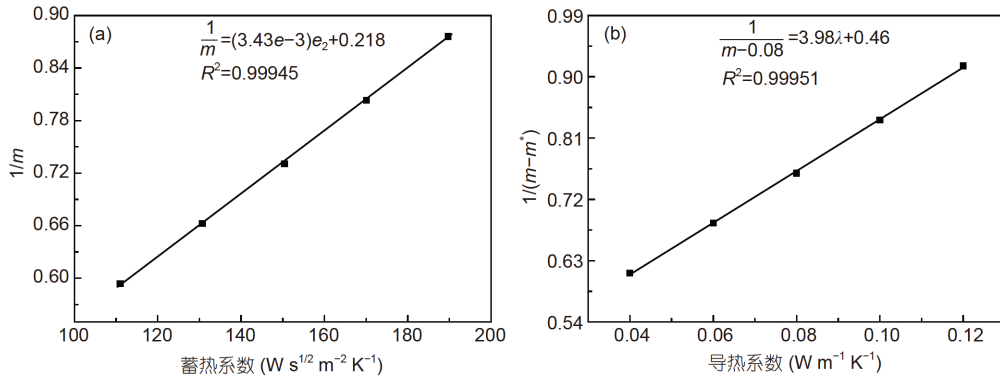


图 6 泡沫类材料校准曲线. (a) 蓄热系数校准曲线; (b) 导热系数校准曲线
Figure 6 Calibration curves of foams. (a) Calibration curve of effusivity; (b) calibration curve of thermal conductivity

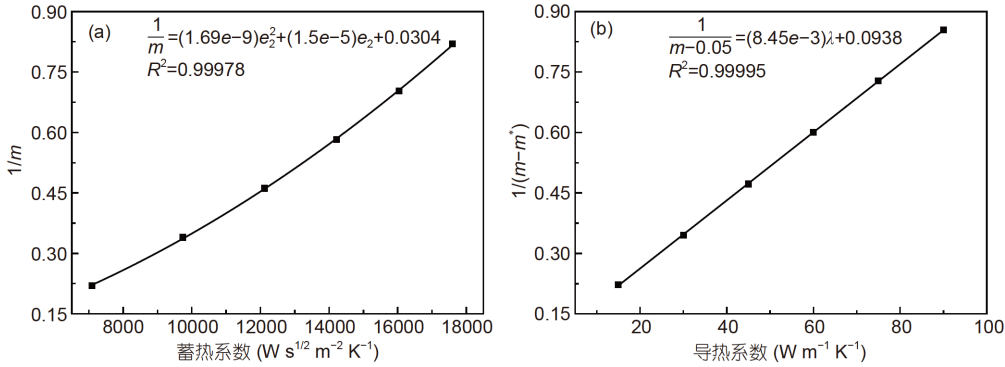


图 7 金属类材料校准曲线. (a) 蓄热系数校准曲线; (b) 导热系数校准曲线
Figure 7 Calibration curves of metals. (a) Calibration curve of effusivity; (b) calibration curve of thermal conductivity

8(a)); 对于陶瓷类和金属类材料, 不同校准曲线所得结果与模拟给定值最大偏差分别为5.9%和6.6%(图8(b)和(c)), 说明不同校准曲线对蓄热系数结果没有较大影响. 将上述4组泡沫类材料的蓄热系数与温升斜率关系进行对比发现, 不同材料蓄热系数与 $1/m$ 之间都呈线性关系, 且拟合线性度较高, $R^2 > 0.999$, 如图9所示. 陶瓷类和金属类分别属于中、高导热材料, 其蓄热系数和 $1/m$ 之间呈二次关系, 拟合相关性也较好. 因为蓄热系数计算公式表明材料的温升与蓄热系数存在对应关系, 有严格的理论推导公式, 只有在对温升曲线和蓄热系数校准曲线进行一次或二次拟合时会产生误差, 而拟合过程中相关指数 $R^2 > 0.999$, 所以拟合产生的误差很小. 这就解释了不同校准曲线均可获得准确蓄热系数结果的原因.

图10表示不同校准曲线对导热系数的影响. 对于泡沫类材料, 不同校准曲线所得结果有明显差异, 与模拟给定值最大偏差达到64.8%(图10(a)); 对于陶瓷类和

金属类材料, 不同校准曲线所得结果与给定值最大偏差分别为46.6%和11.2%(图10(b)和(c)), 说明校准曲线对导热系数测量结果有较大影响. 其原因是导热系数的计算公式(7)表明, 导热系数与温升斜率 m 和校准系数 m^* 呈线性关系, 而该式缺乏严格的理论推导, 是建立在同一类型材料物性相差不大的条件下拟合得到的, 所以相比于蓄热系数测试, 导热系数的测量误差较大. 由于探头隔热层也为低导热的泡沫类材料, 在测试泡沫类材料时, 探头背面吸收的热量占比十分显著, 导致探头加热时大部分热量传递给被测材料这一理论假设失效, 这也是泡沫类材料不同校准曲线所得结果出现较大差异的另一个原因. 不同物性的泡沫类材料受隔热层影响不同, 导致不同校准曲线所得结果出现了如图10(a)所示的不同偏差.

4.3 接触热阻的影响

TCi测量理论假设探头和被测材料之间没有接触

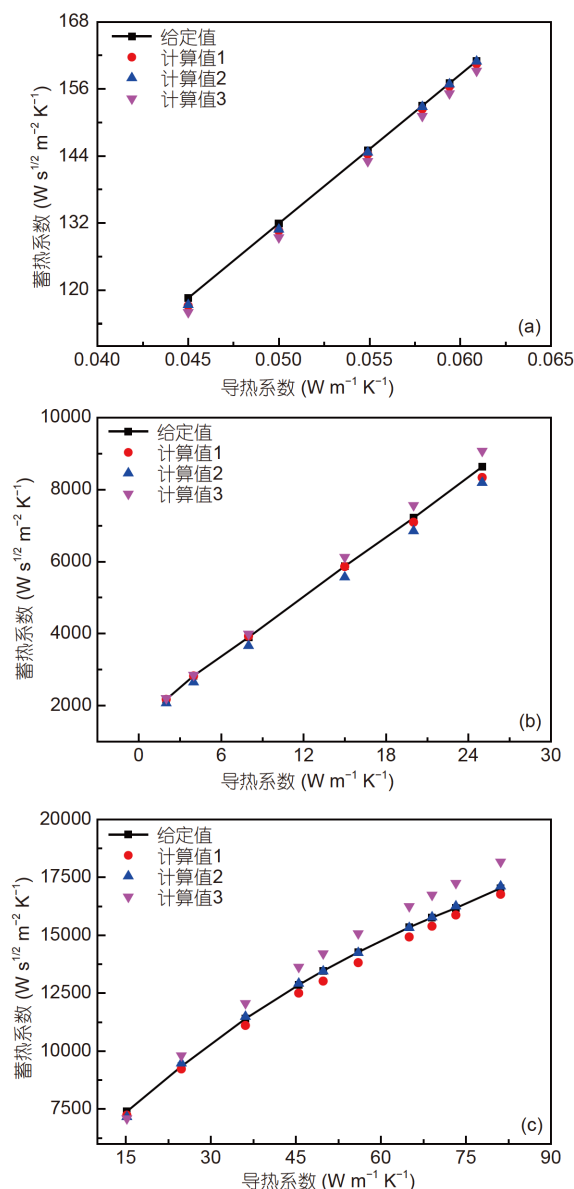


图8 (网络版彩色)不同校准曲线对蓄热系数的影响。(a) 泡沫类;(b) 陶瓷类;(c) 金属类
Figure 8 (Color online) Influence of different calibration curves on effusivity. (a) Foams; (b) ceramics; (c) metals

热阻,而实际测试中接触热阻不可避免。为揭示接触热阻的影响,在图3所示计算区域的探头和被测材料之间设置厚度为0.01 mm的薄层,通过改变薄层的导热系数大小来考虑接触热阻的影响。图11为接触热阻对不同材料导热系数的影响。为了消除校准曲线的影响,图中所有值都是同一校准曲线计算的结果。如图11(a)所示,接触热阻对泡沫类材料导热系数测试结果影响较小,最大偏差为4.7%;而对陶瓷类和金属类材料,接

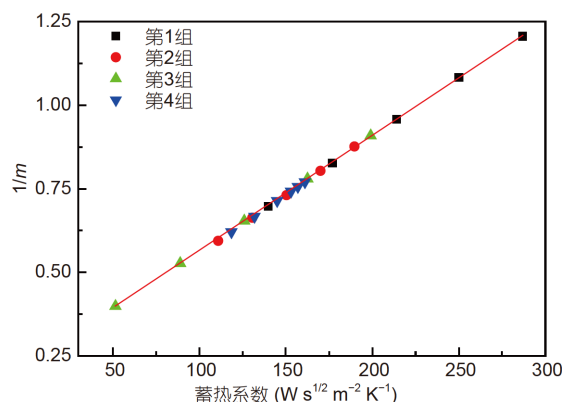


图9 (网络版彩色)泡沫类材料蓄热系数与 $1/m$ 的相关性
Figure 9 (Color online) Correlation between effusivity and $1/m$ of foam

触热阻的存在使导热系数值出现了一定程度的偏低,最大偏差分别为14.5%和25.4%,偏差随导热系数的增大而增加,如图11(b)和(c)所示,说明接触热阻对导热系数越大的材料影响越大。具体原因是,导热系数较小的泡沫类材料物性参数与空气相近,且测试时间相对较长,温升拟合时可以消除接触热阻的影响,而高导热材料物性参数与空气相差很大,接触热阻会对其动态温度响应产生较大影响,且高导热材料测试时间较短,接触热阻影响的时间相对较长,因此对测试结果影响较大。接触热阻对蓄热系数也有相同的影响规律,此处不再赘述。实际测试中,除泡沫类等吸水材料外,可添加一定的接触剂来降低接触热阻的影响,如在5~70℃的环境下添加水为接触剂,其余情况可添加乙二醇或油脂等介质。本文模拟环境温度为25℃,探头和被测材料之间应添加水作为接触剂,模拟时将接触热阻层的物性参数设置为水的物性参数以考虑接触剂的影响。图11(b)和(c)中三角曲线为添加接触剂后的导热系数结果,与无接触热阻时的结果非常接近,最大差别分别为3.9%和7.2%,说明添加接触剂可以显著减小空气热阻的影响,与实际实验测试规律一致^[14]。

5 结论

通过数值模拟TCi方法测量不同类型材料蓄热系数和导热系数的实验测试过程,分析了TCi方法测试理论假设中校准曲线和接触热阻对测试精度的影响规律,对实际应用TCi方法开展实验测试提供了测量误差分析依据。得出结论如下:

(1) TCi方法可以比较准确地获得不同材料的蓄热系数。不同校准曲线对蓄热系数结果影响不大;而不同

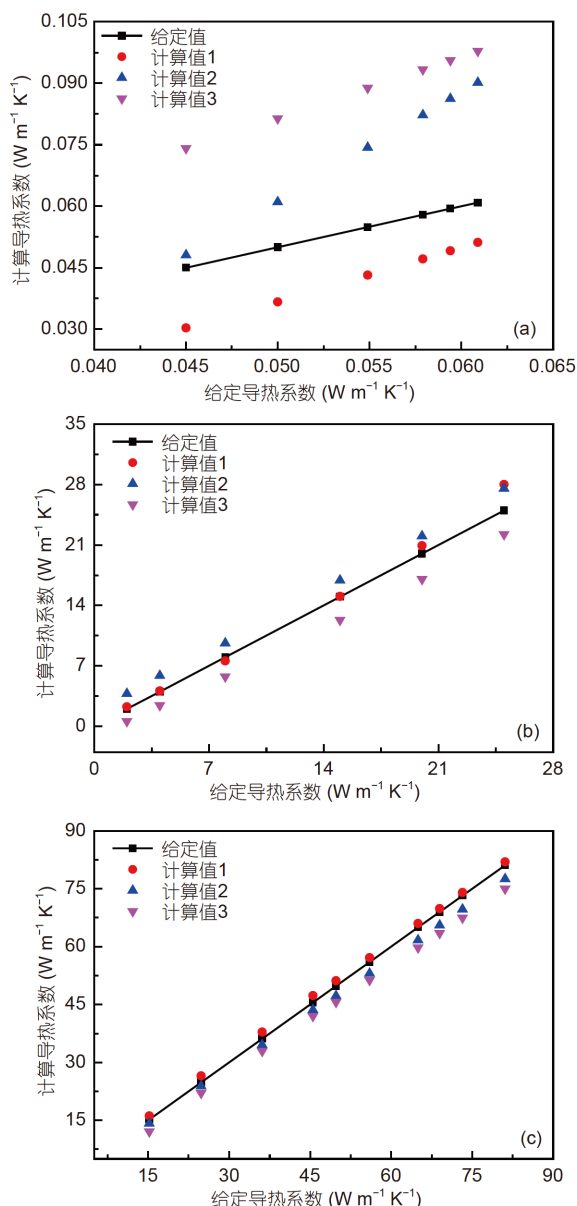


图 10 (网络版彩色)不同校准曲线对导热系数的影响. (a) 泡沫类; (b) 陶瓷类; (c) 金属类
Figure 10 (Color online) Influence of different calibration curves on thermal conductivity. (a) Foams; (b) ceramics; (c) metals

导热系数校准曲线所得结果有较大差异, 尤其是泡沫类材料, 会因其物性参数与探头隔热层接近而导致TCi理论假设无法满足, 使测试结果产生较大偏差.

(2) 接触热阻的存在会使材料导热系数和蓄热系数结果偏低, 并且对导热系数和蓄热系数越大的材料

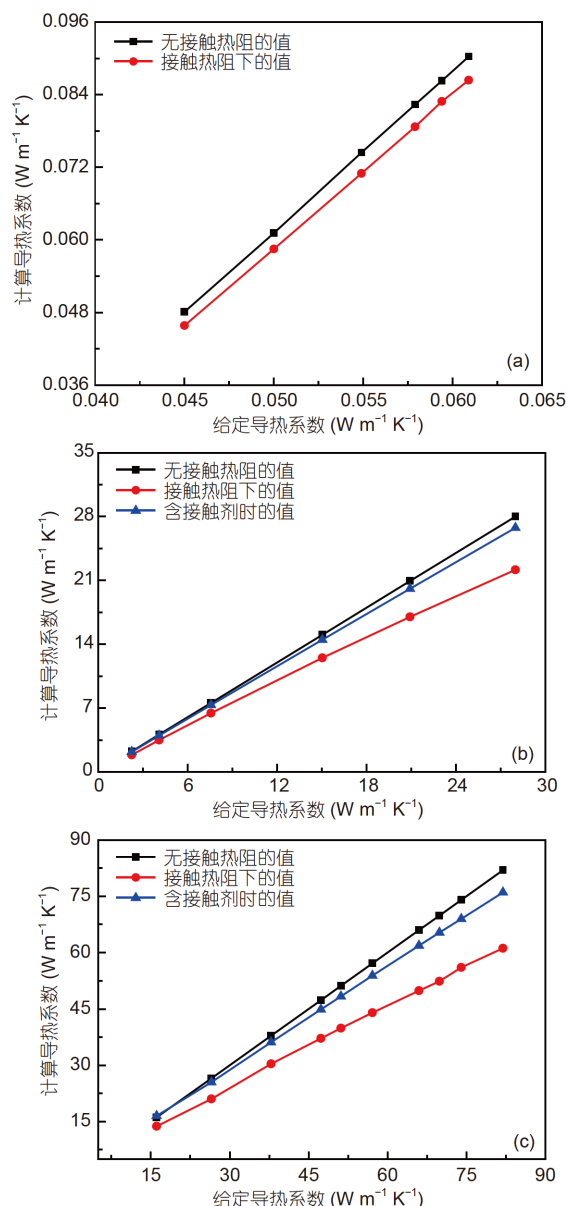


图 11 (网络版彩色)接触热阻对导热系数的影响. (a) 泡沫类; (b) 陶瓷类; (c) 金属类
Figure 11 (Color online) Influence of thermal contact resistance on thermal conductivity. (a) Foams; (b) ceramics; (c) metals

影响越大, 而添加接触剂可以显著减小接触热阻的影响.

(3) 为准确测试低导热材料导热系数, 可通过测试蓄热系数后, 根据材料的比定压热容和密度计算得到, 或采用其他测量方法进行测试.

参考文献

- Guo J F, Zhao Y, Tang G H. Doping method for opacifier and fiber in aerogel composites (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2442–2450 [郭江

- 峰, 赵越, 唐桂华. 气凝胶复合材料中遮光剂及纤维的掺杂方法. 科学通报, 2017, 62: 2442–2450]
- 2 Hammerschmidt U, Hameury J, Strnad R, et al. Critical review of industrial techniques for thermal-conductivity measurements of thermal insulation materials. *Int J Thermophys*, 2015, 36: 1530–1544
 - 3 Mathis N, Chandler C. Direct thermal conductivity measurement technique. US Patent, 6676287-B, 2004-1-13
 - 4 Cha J, Seo J, Kim S. Building materials thermal conductivity measurement and correlation with heat flow meter, laser flash analysis and TCi. *J Therm Anal Calorim*, 2012, 109: 295–300
 - 5 Sánchez Fajardo V M, Torres M E, Moreno A J. Hydraulic and hygrothermal properties of lightweight concrete blocks with basaltic lapilli as aggregate. *Constr Build Mater*, 2015, 94: 398–407
 - 6 Kuvandykova D, St-Laurent R. Application of the modified transient plane source technique in testing the thermal conductivity of concrete. *C-Therm Technol*, 2010, 18: 1–7
 - 7 Venkataraman M, Mishra R, Wiener J, et al. Novel techniques to analyse thermal performance of aerogel-treated blankets under extreme temperatures. *J Textile Inst*, 2015, 106: 736–747
 - 8 Kim S, Seo J, Cha J, et al. Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Constr Build Mater*, 2013, 40: 501–505
 - 9 Iqbal M, McCullough M, Harris A, et al. Thermal conductivity of polyurethane composites containing nanometer- and micrometer-sized silver particles. *J Therm Anal Calorim*, 2012, 108: 933–938
 - 10 Wang S, Liang R, Wang B, et al. Dispersion and thermal conductivity of carbon nanotube composites. *Carbon*, 2009, 47: 53–57
 - 11 Harris A, Kazachenko S, Bateman R, et al. Measuring the thermal conductivity of heat transfer fluids via the modified transient plane source (MTPS). *J Therm Anal Calorim*, 2014, 116: 1309–1314
 - 12 Yoshihashi Y, Sato M, Kawano Y, et al. Evaluation of physicochemical properties on the blending process of pharmaceutical granules with magnesium stearate by thermal effusivity sensor. *J Therm Anal Calorim*, 2013, 113: 1281–1285
 - 13 Tye R P, Hume D. Reference materials for thermal transport properties measurements. *J Therm Anal Calorim*, 2018, 131: 289–299
 - 14 Xu Y L, Zhou Y S, Wang S. The influence factor analysis of testing material thermal conductivity with TCI thermal conductivity meter (in Chinese). *China Meas Test*, 2016, 42: 136–140 [项永亮, 周亚素, 王思. TCI导热仪测试材料导热系数的影响因素分析. 中国测试, 2016, 42: 136–140]
 - 15 Mikulić D, Milovanović B. TCI system for non-destructive determination of thermal properties of materials. In: *Proceedings of 10th European Conference on Non-destructive Testing 2010*. Moscow, 2010. 1364–1373
 - 16 Cha J, Seo J, Kim S. Building materials thermal conductivity measurement and correlation with heat-flow meter, laser flash and TCi. *J Therm Anal Calorim*. 2012, 109: 295–300
 - 17 Zhang H, He L, Cheng S, et al. A dual-thermistor probe for absolute measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by the heat pulse method. *Meas Sci Technol*, 2003, 14: 1396–1401
 - 18 Zhang H, Jin Y, Gu W, et al. A numerical study on the influence of insulating layer of the hot disk sensor on the thermal conductivity measuring accuracy. *Prog Comput Fluid Dyn*, 2013, 13: 191–201
 - 19 Qiu L, Zou H Y, Tang D W, et al. Inhomogeneity in pore size appreciably lowering thermal conductivity for porous thermal insulators. *Appl Therm Eng*, 2018, 130: 1004–1011
 - 20 Qiu L, Zhu N, Zou H Y, et al. Advances in thermal transport properties at nanoscale in China. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 125: 413–433
 - 21 C-Therm Technologies. C-Therm TCi operator manual, 2008

补充材料

表S1 不同类型材料的物性参数

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “TCi方法测试理论假设引入测量误差数值分析”

A numerical study of the measurement error introduced by TCi theoretical assumptions

Yixin Ma¹, Hu Zhang^{1*}, Xian Wang¹ & Guihua Tang²

¹ State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: huzhang@xjtu.edu.cn

Thermal conductivity is the key thermal property of materials that are used in thermal protection of aircraft and energy conservation field, and its accurate test is of great significance in such fields. TCi method is a transient method of measuring thermal conductivity and effusivity, which was developed from the transient plane source method in the last decade. TCi technique has been widely used to measure the thermal conductivity of various materials due to its advantages of simple, rapid and single-side *in-situ* measurement. But the nominal accuracy is lack of sufficient verification within the full test ranges. Studies have found that the results of thermal conductivity measured by different methods for the same material may be different. Even if the same method and instrument are used to measure the same material, the results by using different test modes may vary significantly. The uncertainty of a dynamic test mainly comes from two aspects, theoretical assumptions of test theory and errors of determining input/output parameters. The latter one can be improved by adopting test facilities with higher precision and resolution, and the error usually can be estimated using the error transfer function. However, the uncertainty introduced by theoretical assumptions is difficult to determine and may lead to an incorrect result when the practical measurement deviates from the theoretical assumptions. For TCi method, except for the errors of determining input/output parameters, the theoretical assumptions in deducing the theory, the calibration curves and the contact resistance will affect the test accuracy. In this study, the influence of the above factors on the accuracy of thermal conductivity and effusivity determined by TCi technique are revealed quantitatively using numerical simulation. Firstly, the practical transient test process of TCi method is reproduced in the simulation with all thermophysical properties given. Secondly, the heat transfer processes of measuring foams, ceramics and metals by TCi method are simulated, and the calibration curves of thermal conductivity and effusivity of each type materials are obtained according to the corresponding temperature increase curve and the theoretical basis of TCi method. The influence of calibration curves on the test uncertainty is analyzed by comparing the calculated values of different calibration curves with the given values in the simulation. Finally, the influence of contact resistance on the test accuracy of different materials is analyzed by setting a thin layer of air between the sensor and the sample. The results show that TCi method could measure the effusivity of different materials accurately, and the different calibration curves have little influence on it. However, the results obtained by different thermal conductivity calibration curves are quite different, especially for the foam materials. The contact resistance between the sensor and the sample will decrease the test results of the high thermal conductivity material, while the effect can be ignored for foam materials. And the influence of contact resistance can be significantly reduced by adding contact agent. Due to the calibration curve and contact resistance in theoretical assumptions of TCi method will affect the test accuracy, the errors introduced by theoretical assumptions should be analyzed when adopting TCi method.

thermal conductivity, TCi method, effusivity, theoretical assumption, measurement error, numerical simulation

doi: [10.1360/TB-2019-0607](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0607)