

探头热容对瞬态平面热源法测量轻质保温材料导热影响研究

林永钢¹, 尚福强¹, 吴得卿¹, 杜晨冉², 刘志颖², 李 辉², 安雪晖^{3*}

¹中电建路桥集团有限公司, 北京

²清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京

³清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京

Email: *anxue@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020年10月22日; 录用日期: 2020年11月6日; 发布日期: 2020年11月13日

摘 要

瞬态平面热源法广泛用于材料热导率测量, 但轻质保温材料的热容量很小, 测试时探头热容量会引起一定的误差。本文通过数值模拟定量研究了探头热容对不同热容保温材料的影响, 分析了这项误差的大小, 结果表明, 密度小于100 kg/m³的保温材料, 其热容影响导致的误差大于20%, 在测量导热系数时必须采用修正热容的计算模型。

关键词

瞬态平面热源法, 热导率, 模型修正

Modified Calculation Model of TPS Method Measuring Thermal Conductivity

Yonggang Lin¹, Fuqiang Shang¹, Deqing Wu¹, Chenran Du², Zhiying Liu², Hui Li², Xuehui An^{3*}

¹Power China Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing

²Key Laboratory for Thermal Sciences and Power Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing

³State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: *anxue@mail.tsinghua.edu.cn

Received: Oct. 22nd, 2020; accepted: Nov. 6th, 2020; published: Nov. 13th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 林永钢, 尚福强, 吴得卿, 杜晨冉, 刘志颖, 李辉, 安雪晖. 探头热容对瞬态平面热源法测量轻质保温材料导热影响研究[J]. 材料科学, 2020, 10(11): 858-864. DOI: 10.12677/ms.2020.1011103

Abstract

The transient plane heat source method is widely used as a method for measuring the thermal conductivity of materials. However, the probe thermal capacity will cause certain errors for light-weight insulation materials. In this paper, numerical simulation is used to quantitatively study the influence of the probe heat capacity on insulation materials with different heat capacity. The result shows that when density is less than 100 kg/m^3 , the error caused by probe capacity is greater than 10%, so the calculation model with heat capacity correction must be used when measuring the thermal conductivity of light-weight insulation materials.

Keywords

TPS, Thermal Conductivity, Modified Calculation Model

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着保温材料的快速发展和应用,对保温材料导热系数的测量提出了更高要求,新的测量方法、测试装置也逐渐出现。相对于测量时间长、控制条件苛刻的稳态测量法,具有快速准确、多参数同步测量等优点的非稳态法近年来得到了飞速发展。其中,瑞典 Chalmers 理工大学 S.E.Gustafsson 教授[1]等人提出的 TPS 法(Transient Plane Source method,瞬态平面热源法)因其融合了平面热源形式以及热线法优点而受到广泛关注[2]-[15]。TPS 法基于加热的圆盘形热源产生的即时或瞬态温度响应,通过拟合温升与热源探头响应时间的关系,根据原理公式并结合有效的估计算法,即可求出热导率、热扩散率等物性参数。基于各向同性材料及半无限大假设,TPS 法的适用性和有效性已经在固相材料热物性测量中得到广泛论证[2]-[7]。通过对该模型进行细化,目前该方法亦成功应用于液体物性测量[8] [9] [10] [11]。

TPS 法优点是测量耗时短,测量种类多样,通过一次测量可同时获得多个物性参数等,但其原理方程即导热微分方程复杂,且在实际测量中很难达到理想的测试边界条件,因而精度相对稳态法较低[12]。此外,更为关键的是,TPS 法的理想数学模型推导中往往忽略探头厚度,且默认探头与试样间紧密接触无热阻,这与实际不符,已有研究明确指出探头热容、时间延迟是造成 TPS 法测量精度下降的主要因素[13]。实际应用方面,HotDisk 测量仪器实现了加热及计算一体化测量过程,热导率精度达到 1%,符合现行标准的要求精度(<5%),并能给出探头热容、延迟时间等计算参数。

应用于建筑节能的保温材料本身热导率和热容量很低,采用 TPS 法测量其物性参数显然更容易受到探头热容的影响,不可避免造成实际测量值与理想模型预测结果存在偏差。针对轻质保温材料,本文通过数值模拟获得不同密度保温材料的温升曲线,对比是否采用探头热容修正模型的导热系数计算结果的差异,定量研究探头热容对轻质保温材料导热系数测量的影响。

2. 理想模型及修正

2.1. 理想模型

瞬态平面热源法测量材料热导率及热扩散系数实验多采用如图 1 所示的薄膜型探头,探头多采用温度系数高、稳定性好的镍或钼薄片,蚀刻成双螺旋结构,由聚酰亚胺薄膜包裹[14]。

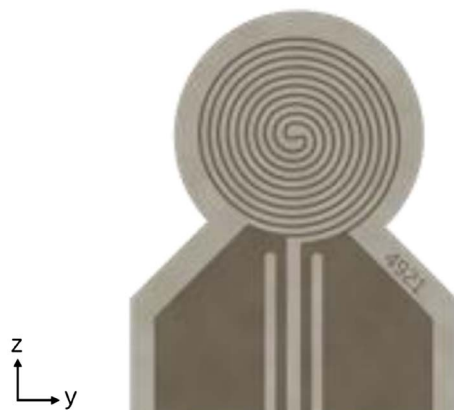


Figure 1. Hot Disk sensor

图 1. Hot Disk 探头

为方便理论分析,理想模型须满足如下假设:1)忽略热源热容及时间延迟影响;2)相对于探头,样品为无限大均匀介质,探头不受样品边界的影响;3)导热在空间坐标系的 yz 平面内进行等。在上述假设下,可以得到在 yz 平面内坐标为 (y, z) 的介质点温升为[15]。

$$\Delta T(y, z, \tau) = (4\pi^{3/2}r\lambda)^{-1} \int_0^\tau d\sigma \sigma^{-2} \int_A dy' dz' \times Q(y'z't - \sigma^2 r^2/a) \exp\left\{-\left[\frac{(y-y')^2 + (z-z')^2}{4\sigma^2 r^2}\right]\right\} \quad (1)$$

其中 r 为探头最外圈半径; t 为测量时间; λ 为被测材料热扩散系数,单位 m^2/s ; a 为被测材料热导率,单位 $\text{W}/(\text{mK})$; τ 为无量纲时间, $\tau = \sqrt{\lambda t}/a$; σ 为积分变量; Q 为热流密度,单位 W/m^2 ; A 为探头发热面积, m^2 。

探头温升监控通过对镍金属电阻值测量实现。镍阻值与探头表面平均温升关系为

$$R = R_0 \left(1 + \alpha \overline{\Delta T(\tau)}\right) \quad (2)$$

其中 R_0 为初始电阻值,单位 Ω ; α 为电阻温度系数,单位 K^{-1} 。

将探头双螺旋结构简化为同心圆结构后,探头表面平均温升计算式为

$$\overline{\Delta T(\tau)} = P_0 D(\tau) / (\pi^{3/2} r \lambda) \quad (3)$$

$$D(\tau) = [m(ml)]^{-2} \int_0^\tau d\sigma \sigma^{-2} \times \left[\sum_1^m l \sum_1^m k \exp\left(\frac{-(l^2 + k^2)}{4m^2 \sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2 \sigma^2}\right) \right] \quad (4)$$

其中 P_0 为探头发热功率,单位 W ; m 为探头圆环个数; I_0 为第一类零阶修正贝塞尔函数。

根据上述模型,待测材料热导率 Λ 可通过线性拟合斜率 $P_0/(\pi^{3/2} a \Lambda)$ 得到。

2.2. 探头热容修正模型

理想模型中,探头的厚度及热容都被忽略。实际测量时,探头本身升温吸热,加热待测试样的热功率略小于探头电功率,即 t 时刻探头对样品的实际加热功率为

$$P(t) = P_0 - \frac{\partial(c\overline{\Delta T(\tau)})}{\partial t} \quad (5)$$

其中 c 为探头热容,单位 J/K 。

假设测量过程中探头热容 c 为常数,用差分法表示探头平均温升 $\overline{\Delta T(\tau)}$,有

$$P(t_i) = P_0 - c \frac{\overline{\Delta T(\tau_{i+1})} - \overline{\Delta T(\tau_{i-1})}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (6)$$

其中 $\tau_i = \sqrt{\kappa t_i} / a$ 。

则探头表面温升表达式为

$$\overline{\Delta T(\tau_i)} = P(t_i) D(\tau_i) / (\pi^{3/2} a \Lambda) \quad (7)$$

公式(7)即为考虑探头热容的修正模型[16]。

3. 实验方法

本文将通过数值模拟得到不同物性的保温材料在 Hot Disk 测试过程中的温升曲线, 然后分别使用两种方法处理相同的时间温升数据并对比热导率和热扩散系数计算结果。

模拟使用 Fluent 15.0 软件, 网格及边界条件如图 2 所示。为了验证模拟计算的可靠性, 首先使用 CFD 计算软件模拟导热系数参比板的温升曲线, 与实验测量结果进行比较。样品未被加热表面设置为恒为 300 K 边界条件, 探头处热流密度根据仪器测量中加热功率设置为 0.01 W。瞬态模拟时长与仪器测量时长相同, 为 40 s, 时间步长为 0.01 s。考虑探头热容时, 探头热容值取仪器计算时的取值, 为 0.00984 J/K, 模型中探头的厚度由材料体积热容量及探头面积计算得出。温升曲线如图 3, 结果吻合。

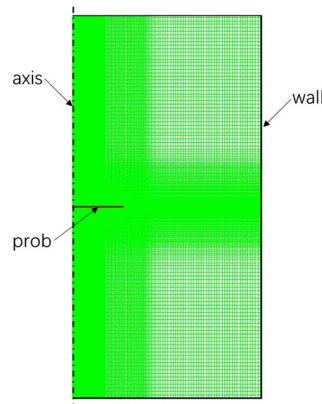


Figure 2. Schema of computing model of thermal conduction accounting of heat capacity of sensor
图 2. 计入探头热容导热过程模拟计算示意图

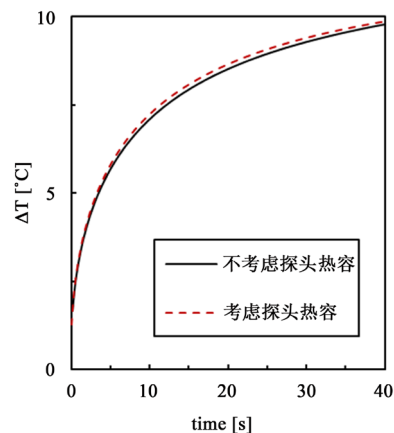


Figure 3. Temperature increase of with and without prob thermal capacity
图 3. 模拟温升曲线与实验对比

数值模拟的保温材料导热系数为 0.03~0.1 W/mK, 密度为 40~200 kg/m³, 比热均为 1000 J/kgK。根据模拟得到的温升曲线, 采用 1.3 中公式(3)(7)分别计算是否修正探头热容的热扩散系数和热导率。

4. 结果与讨论

不同密度的温升曲线如图 4。导热系数 0.03 W/mK, 密度 40 kg/m³ 时, 由于初期温升较快, 探头吸热更多, 所以考虑探头热容的温升明显低于不考虑探头热容, 而加热一段时间后, 进入准稳态阶段, 温升速率逐渐降低并趋于稳定, 此时探头热容量影响也逐渐减弱。密度更大时, 由于样品的热容量增大, 故探头热容的影响有所减弱, 温升曲线较为一致。

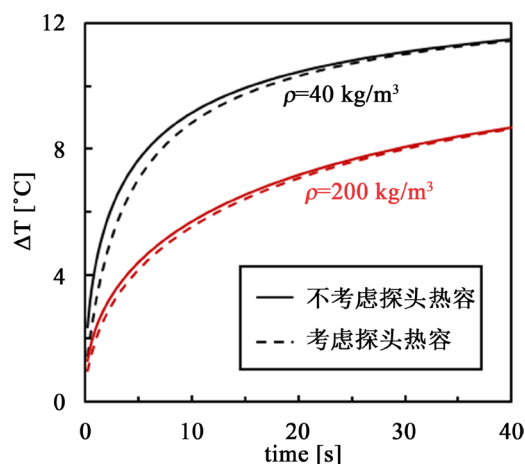


Figure 4. Temperature increase of different samples
图 4. 不同密度样品的温升曲线

Hot disk 方法首先对温升曲线进行线性拟合, 通过最优化算法计算出热扩散率, 然后再由斜率计算导热系数。由于探头热容的影响, 温升曲线的弯曲程度发生改变, 若不考虑探头热容影响, 则计算出的热扩散率会偏大(如图 5)。当密度小于 100 kg/m³ 时, 热扩散率误差大于 10%, 更小密度的保温材料误差甚至可达 90%。热扩散率的误差进而影响导热系数的计算, 使得测量值偏小(如图 6)。当密度为 100 kg/m³ 时, 导热系数误差约 8%, 更小密度的保温材料误差可达 30%~40%。

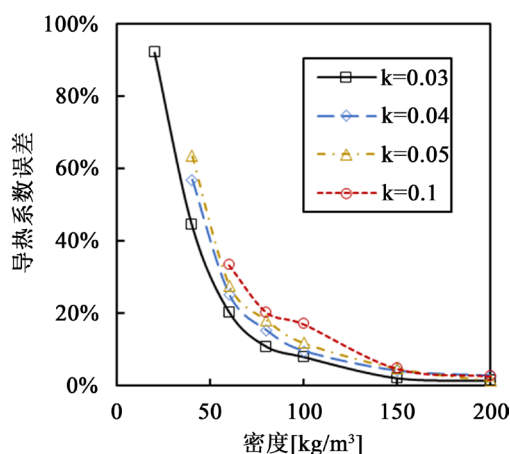


Figure 5. Thermal diffusivity measurement error
图 5. 热扩散率测量误差

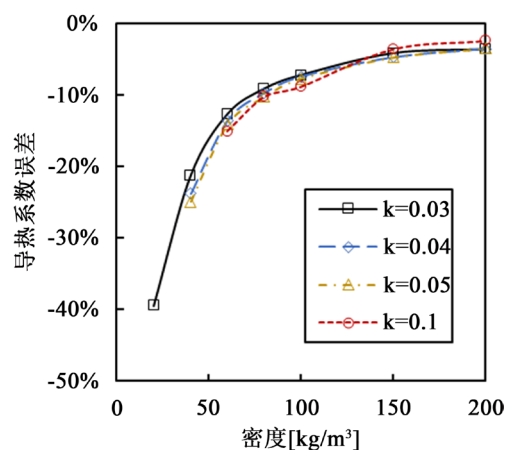


Figure 6. Thermal conductivity measurement error
图 6. 导热系数测量误差

5. 结论

根据结果讨论, 可以得出以下结论:

1) 采用瞬态平面热源法测量轻质保温材料热导率和热扩散系数的实际过程中, 探头热容会对探头升温过程产生影响, 使得加热初期的温升明显降低; 2) 计算时忽略探头热容, 热扩散率会偏大, 热导率偏小, 样品热容量越小, 误差越大。

参考文献

- [1] Gustafsson, S.E. (1991) Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Solid Materials. *Review of Scientific Instruments*, **62**, 797-804. <https://doi.org/10.1063/1.1142087>
- [2] Gohar, G.A., Manzoor, T. and Shah, A.N. (2017) Investigation of Thermal and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys with Silver Addition Prepared by Powder Metallurgy. *Journal of Alloys & Compounds*, **735**, 802-812. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.176>
- [3] Mirzanamadi, R., Johansson, P. and Grammatikos, S.A. (2018) Thermal Properties of Asphalt Concrete: A Numerical and Experimental Study. *Construction & Building Materials*, **158**, 774-785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068>
- [4] Izhar-Ul-Haq, Saxena, N.S., Gustafsson, S.E., et al. (1991) Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Rock-Marbles Using Transient Plane Source (TPS) Technique. *Heat Recovery Systems & CHP*, **11**, 249-254. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(91\)90070-K](https://doi.org/10.1016/0890-4332(91)90070-K)
- [5] Ibos, L., Tlili, R., Boudenne, A., et al. (2018) Thermophysical Characterization of Polymers According to the Temperature Using a Periodic Method. *Polymer Testing*, **66**, 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.023>
- [6] Mihiretie, B.M., Cederkrantz, D., Rosén, A., et al. (2017) Finite Element Modeling of the Hot Disk Method. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **115**, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.036>
- [7] Lagüela, S., Bison, P., Peron, F., et al. (2015) Thermal Conductivity Measurements on Wood Materials with Transient Plane Source Technique. *Thermochimica Acta*, **600**, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.11.021>
- [8] Nagai, H., Rossignol, F., Nakata, Y., et al. (2000) Thermal Conductivity Measurement of Liquid Materials by a Hot-Disk Method in Short-Duration Microgravity Environments. *Materials Science & Engineering A*, **276**, 117-123. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00519-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00519-5)
- [9] Warzoha, R.J. and Fleischer, A.S. (2014) Determining the Thermal Conductivity of Liquids Using the Transient Hot Disk Method. Part I: Establishing Transient Thermal-Fluid Constraints. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **71**, 779-789. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.064>
- [10] Warzoha, R.J. and Fleischer, A.S. (2014) Determining the Thermal Conductivity of Liquids Using the Transient Hot Disk Method. Part II: Establishing an Accurate and Repeatable Experimental Methodology. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **71**, 790-807. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.062>

- [11] He, Y. (2005) Rapid Thermal Conductivity Measurement with a Hot Disk Sensor: Part 1. Theoretical Considerations. *Thermochimica Acta*, **436**, 130-134. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.07.003>
- [12] Zhang, H., Li, Y.M. and Tao, W.Q. (2017) Theoretical Accuracy of Anisotropic Thermal Conductivity Determined by Transient Plane Source Method. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **108**, 1634-1644. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>
- [13] 王强, 戴景明, 张虎. Hot Disk 建模及模型精度分析[J]. 中国计量学院学报, 2008, 4(19): 309-313.
- [14] 段恺, 任静, 刘强. GB/T32064-2015, 建筑用材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] Carlaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959) *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Univ. Press, New York.
- [16] ISO/FDIS 22007-2, Plastics—Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity—Part 2: Transient Plane Heat Source (Hot Disc) Method.