

考虑热探针接触热阻的热物性测量方法研究

程文龙, 马 然, 刘 娜, 谢 鲲

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:提出了基于考虑接触热阻的热探针导热微分方程的精确解,利用蒙特卡罗反演和分层修正的热探针热物性测量方法,可以同时测量热导率、比热容等热物性参数.利用该方法,对一些液体和固体材料的热导率进行了测量,并与其他测量方法的结果进行了分析与比较.结果表明,采用该方法所得热导率具有较高的精度,平均测量误差约为1.1%;进而针对比热容反演精度较低的问题,论文采用分层修正方法后,比热容的平均测量误差可达到2.6%,精度有了较大提高.对测量结果进行比较发现,接触热阻对固体热导率影响较大,对液体热导率的影响可以忽略;接触热阻对比热容的测量结果的影响不大.

关键词:热导率;比热容;热探针;接触热阻;蒙特卡罗

中图分类号:TK31 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.012

Study on thermal property measurement method considering thermal contact resistance of the thermal probe

CHENG Wenlong, MA Ran, LIU Na, XIE Kun

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A thermal properties measurement method is proposed, based on the exact solution of the thermal probe problem, in which the thermal contact resistance is considered. Thermal conductivity, specific heat capacity and other thermal properties can be measured with the utilization of the Monte Carlo inversion and a layered correction method. The thermal conductivities of several liquid and solid samples were measured, and the effects of various methods were analyzed and compared. The results show that the average measurement deviation is about 1.1% and a higher precision is obtained with the method presented. For the low precision inversion of specific heat capacity, a layered correction method was adopted and the average measurement deviation could reach 2.6%, thus greatly enhancing the measurement accuracy. The measurement results show that the thermal contact resistance has a great effect on the thermal conductivities of solid samples, but has little or no effect on liquid samples or on the specific heat capacity of all samples.

Key words: thermal conductivity; specific heat capacity; thermal probe; thermal contact resistance; Monte Carlo

0 引言

热探针方法在热导率测量中具有广泛应用. 传统的热探针方法往往忽略探针壁面与待测样品之间的接触热阻, 在假定热探针无限细、忽略其自身热容的基础上, 通过简化, 得到待测样品热导率的近似表达式^[1]. 但是利用该方法所得到的测量结果不仅不可避免地存在着系统误差, 而且也很难得到除热导率之外的其他热物性参数.

针对探针自身参数的影响, 研究者们提出了很多改进的方法^[2-4], 但是, 这些改进所依据的理论基础仍然是简化后的数学模型, 因此并没有从根本上消除系统误差. 文献^[5]提出了一种从热探针导热微分方程的精确解出发, 利用蒙特卡罗反演得出待测样品热物性参数的方法, 由于该方法考虑了热探针自身参数的影响, 在大大提高样品热导率测量精度的同时, 还可以得出比热容等热物性参数; 但是, 该方法也没有考虑接触热阻的影响, 因此, 在测量粉末、颗粒等固体样品的热物性时, 也不可避免地存在着系统误差, 同时对比热容的测量精度不高.

针对接触热阻的影响, 文献^[6]采用整体成型的复合吸附剂使热针与复合吸附剂的接触良好, 以避免接触热阻的影响, 但是这种方法的应用范围有限, 对大多数固体材料的测量并不适用; 文献^[7]对于因探针结构、接触热阻以及仪器常数而造成的测量误差, 引入探针系数对测量结果进行校正, 但是该方法并没有具体分析接触热阻的影响. 同时, 以上方法所依据的理论基础依然是简化后的数学模型, 并未将接触热阻作为参数考虑到模型中.

本文在考虑热探针自身参数及探针与待测样品之间接触热阻影响的基础上, 基于精确解的数学模型, 利用蒙特卡罗反演及分层修正方法^[8]建立了可以测量固体和液体样品热导率、比热容等多种热物性参数的高精度热物性测量系统, 并对接触热阻的影响进行分析.

1 考虑接触热阻的蒙特卡罗热导率测试方法

热探针热物性测量方法是将热探针插入待测样品中, 利用热探针加热待测样品, 通过对样品温度随时间变化关系的分析得到待测样品的热物性参数. 由于热探针长度远远大于其直径, 同时热探针多为金属材料, 其热导率远远大于待测样品的热导率, 因

此, 可把热探针加热样品的物理模型简化为一半径为 r_0 的无限长均匀发热体在无限大介质中的非稳态导热问题. 在考虑接触热阻的情况下, 由热探针导热微分方程可以得出探针壁面温升的解析解^[9]:

$$\theta = T_w - T_0 = \frac{2q\omega^2}{\pi^3\lambda} \int_0^\infty \frac{1 - \exp\left(-\frac{\alpha\tau}{r_0^2}u^2\right)}{u^3 \Delta(u, \omega)} du \quad (1)$$

其中,

$$\Delta(u, \omega) = [uJ_0(u) - (\omega - hu^2)J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - (\omega - hu^2)Y_1(u)]^2 \quad (2)$$

式中, T_0/K 为样品初始温度; T_w/K 为探针壁面温度; r_0/mm 为探针半径; τ/s 为加热时间; $q/(W \cdot m^{-1})$ 表示热探针单位长度的加热功率; $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 和 $\alpha/(m^2 \cdot s^{-1})$ 为待测样品的热导率和热扩散系数; $\omega = 2\rho c/\rho_w c_w$ 定义为热容比, 即样品与探针热容之比的两倍, 其中 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ 和 $c/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ 分别表示密度与比热容, 下标“w”表示热探针; $h = 2\pi R\lambda$, 其中 R 为接触热阻; $J_0(u), J_1(u)$ 为第一类贝塞尔的零阶、一阶函数, $Y_0(u), Y_1(u)$ 为第二类贝塞尔的零阶、一阶函数, u 为积分变量.

如果忽略接触热阻的影响, 即 $h=0$, 则式(2)可简化为:

$$\Delta(u, \omega) = [uJ_0(u) - \omega J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - \omega Y_1(u)]^2 \quad (3)$$

把式(3)代入式(1), 即可得到忽略接触热阻时的热探针壁面温升的解析解.

当测试时间足够长时, 可以忽略热探针自身热容等参数的影响, 将式(3)代入式(1), 并对其泰勒展开, 忽略高阶小量, 则待测样品的热导率可近似表示为^[1]:

$$\lambda \approx \frac{q}{4\pi} \frac{d(\ln \tau)}{d\theta} \quad (4)$$

式(4)是传统热探针方法的理论基础, 该式是建立在两个基本假定基础上的: ①热探针无限细亦即具有零截面积; ②热探针的热容为零. 但是实际的热探针并不能严格满足上述条件: 如果测量时间较短, 探针自身热容对结果影响较大; 当测量液体热导率时, 如果测量时间太长, 对流可能已经发生. 因此对于易产生对流的液体, 利用传统热探针方法所测得的热导率的误差较大. 为了克服上述误差, 文献^[5]提出了基于式(1)和式(3), 利用蒙特卡罗反演得出待测样品热导率、比热容等热物性参数的热探针方法.

本文在文献^[5]的基础上, 进一步将考虑接触热阻的导热微分方程精确解(1)作为求解基础, 利用蒙

特卡罗反演得出热导率、比热容以及接触热阻,从而避免传统方法因忽略接触热阻所造成的误差;针对文献[5]比热容测量精度较低的问题,本文采用分层修正方法来修正比热容,即将式(1)中的强影响参数热导率作为全局关键参数,而将弱影响参数比热容及接触热阻作为局部关键参数,在修正全局关键参数基础上修正局部关键参数,然后对参数进行同时修正。

本文把温差标准差最小原则作为判断反演是否成功的判据,定义温差标准差如下,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta T_{M_i} - \Delta T_{P_i})^2}{N-1}} \quad (5)$$

式中, ΔT_{M_i} 为各时间点的测量温差; ΔT_{P_i} 为各时间点的计算温差; N 为所测温度点数。

本文所采用的蒙特卡罗方法计算热物性参数的步骤如下:

(I) 首先假定一组比热容及接触热阻值,把利用乘同余法在一定范围内产生的一系列服从均匀分布的随机数值作为热导率值代入式(1)中计算出理论温差,计算各时间点上实验温差和理论温差的温差标准差,根据判据式(5),选取一个使得数值模拟曲线与实验曲线符合最好的随机数作为热导率值;

(II) 固定步骤(I)所产生的热导率值,采用同样方法得出最适合的比热容值;

(III) 固定步骤(I)及步骤(II)中所产生的热导率值及比热容值,利用与前面步骤相同的方法,反演得出接触热阻值;

(IV) 依次固定热导率、比热容、接触热阻,重复前面的步骤,重新确定热导率、比热容及接触热阻的值,直到得到可靠的热导率及比热容值;

(V) 利用分层修正方法修正比热容,热导率值

及接触热阻的值取步骤(IV)中所得的值。

2 测量结果与分析

2.1 接触热阻对温升曲线的影响

为分析接触热阻对不同状态样品测量结果的影响,图1(a),(b)分别给出了利用本文方法对液体样品及固体样品的反演结果,并利用文献[5]方法的反演结果进行了比较。由图1可以看出,无论是液体样品还是固体样品,本文所用方法反演所得的温升曲线,在整个测量的时间段,都能和实验曲线很好地吻合;而在忽略接触热阻的情况下,对于液体样品来说,利用文献[5]中方法拟合的曲线和实验曲线吻合较好,但是,对于固体样品,理论曲线和实验曲线误差较大。这说明,由于液体样品和探针之间接触良好,其接触热阻可以忽略,因此,是否考虑接触热阻对反演结果的影响不大;但是,对于固体样品来说,接触热阻对反演结果的影响较大,因此,在测量固体样品时,为了得到较高的测量精度,接触热阻的影响不容忽视。

2.2 接触热阻对热导率的影响

为了检验接触热阻对热导率测量结果的影响,本文分别利用传统方法、文献[5]方法以及本文所提方法在环境温度下对甘油、硅油、乙醇、乙二醇4种液体样品以及3种陶瓷沙样品的热导率进行了测量,并将结果进行比较。由于陶瓷沙的热导率缺乏文献参考值,而多层同心圆柱法^[10]的测量原理较为成熟,具有较高的重复率和测量精度,因此本文将利用同心圆柱法测得的陶瓷沙的热导率作为参考值,以验证本文各种测量方法的测量精度。在测量时,对每种样品都进行多次测量,取其平均值作为测量结果。热导率测量结果列于表1中。

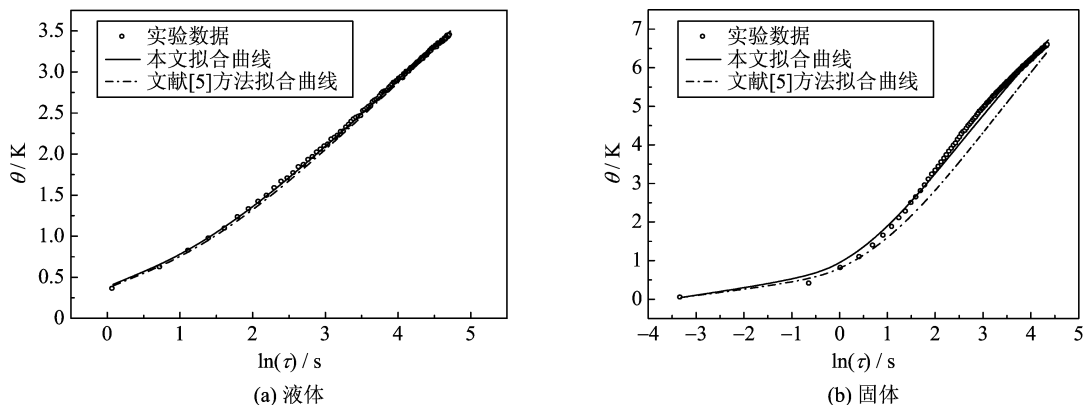


图1 反演曲线与实验结果比较

Fig. 1 Calculation curve versus experimental result

表 1 热导率测量结果比较

Tab. 1 Comparison of thermal conductivity measurement results

| 样品 | λ_r /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 传统方法 | | 文献[5]方法 | | 本文方法 | |
|-------|---|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| | | λ_e /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ | λ_e /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ | λ_e /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ |
| 甘油 | 0.288 ^[1] | 0.297±0.001 | +3.1 | 0.285±0.003 | -1.0 | 0.286±0.002 | -0.7 |
| 硅油 | 0.134 ^[11] | 0.140±0.002 | +4.5 | 0.131±0.001 | -2.2 | 0.133±0.001 | -0.74 |
| 乙醇 | 0.166 ^[1] | 0.184±0.003 | +10.8 | 0.164±0.003 | -1.2 | 0.162±0.001 | -2.4 |
| 乙二醇 | 0.258 ^[1] | 0.270±0.002 | +4.7 | 0.260±0.002 | +0.8 | 0.256±0.002 | -0.76 |
| 陶瓷沙 1 | 0.182* | 0.190±0.001 | +4.4 | 0.186±0.001 | -2.2 | 0.179±0.006 | -1.6 |
| 陶瓷沙 2 | 0.184* | 0.191±0.001 | +3.8 | 0.180±0.003 | -2.2 | 0.183±0.002 | -0.5 |
| 陶瓷沙 3 | 0.165* | 0.176±0.004 | +6.7 | 0.158±0.001 | -4.2 | 0.163±0.002 | -1.2 |

【注】热导率相对误差 $\delta = (\lambda_e - \lambda_r) / \lambda_r \times 100\%$, 其中 λ_e 与 λ_r 分别表示测量值和文献参考值; * 表示是利用多层同心圆柱法所测值。

从表 1 可以看出,和传统测量方法相比,本文所提方法对于热导率的测量精度有显著提高:对于无水乙醇这种易挥发的样品其最大相对误差仅为 2.4%,其他几种样品热导率平均绝对误差约为 0.73%,对于 3 种陶瓷沙样品,热导率平均误差为 1.1%;而采用传统方法所测乙醇的测量误差超过了 10%,其他几种液体样品,最大相对误差为 4.7%,平均绝对误差为 4.3%左右,对于固体样品,热导率的平均绝对误差为 5%左右。

采用本文方法所得结果和文献[5]方法所得热导率的比较显示:在液体热导率测量方面,两者的测量精度差别不大,平均测量误差都为 1%左右;但是,在固体热导率测量方面,本文的平均测量误差为 1.1%,而文献[5]方法的平均测量误差为 2.9%,本文所提方法的精度要明显高于文献[5]的精度。出现这种情况的原因在于接触热阻对固体样品热导率的影响较大,对液体样品热导率的影响较小,因此测量土壤、颗粒等固体样品热导率时如果忽略接触热阻可能导致所测结果误差偏大,而测量液体样品时,接触热阻可以忽略。几种样品热导率测量的平均标准

偏差较小,说明利用该方法进行热导率的测量具有较好的可重复性。

2.3 接触热阻及分层修正对比热容的影响

比热容是一个弱敏感性的参数,对温升曲线的影响较热导率对温升曲线的影响小,因此根据文献[5]方法得出的比热容值误差较大。为提高比热容的反演精度,本文采用分层修正方法修正比热容;同时为了检验接触热阻对比热容的影响,在环境温度下,分别利用本文方法和利用文献[5]中方法计算得到几种样品的比热容,并将甘油、硅油、乙醇、水及陶瓷沙 1 的比热容结果和参考值进行比较。比较结果见表 2。

从表 2 看出,甘油、硅油和水这 3 种液体样品在仅考虑接触热阻后,所得比热容的平均误差约为 6.7%,而采用文献[5]方法所得比热容的平均误差约为 6.3%,两者相差不大,并且精度都不理想;对于固体如陶瓷沙 1 样品,两者所得结果测量精度也较为接近。因此,接触热阻对一些性质较稳定的液体样品和固体样品的比热容影响都较小,依靠考虑接触热阻来修正比热容的测量精度较为困难。

表 2 比热容测量结果比较

Tab. 2 Comparison of specific heat capacity measurement results

| 样品 | c_r /(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | 文献[5]方法 | | 仅考虑接触热阻 | | 接触热阻+分层修正 | |
|-------|---|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| | | c_e /(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ | c_e /(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ | c_e /(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\delta/\%$ |
| 甘油 | 2.385 ^[1] | 2.2±0.4 ^[5] | -7.8 | 2.217±0.4 | -7.0 | 2.29±0.01 | -3.6 |
| 硅油 | 1.4 ^[11] | 1.34±0.05 ^[5] | -4.5 | 1.479±0.05 | +5.3 | 1.46±0.007 | +4.2 |
| 乙醇 | 2.451 ^[1] | 2.9±0.3 ^[5] | +18.3 | 2.3±0.3 | -6.2 | 2.4±0.01 | -1.5 |
| 水 | 4.179 ^[1] | 4.5±0.4 ^[5] | +7.7 | 3.91±0.1 | -6.4 | 4.078±0.02 | -2.4 |
| 陶瓷沙 1 | 1.1 ^[1] | 1.034±0.07 | -6.0 | 1.157±0.02 | +5.2 | 1.112±0.07 | +1.1 |
| 陶瓷沙 2 | — | 0.911±0.01 | — | 0.950±0.01 | — | 0.891±0.06 | — |
| 陶瓷沙 3 | — | 1.061±0.02 | — | 1.002±0.07 | — | 1.052±0.05 | — |

【注】比热容相对误差 $\delta = (c_e - c_r) / c_r \times 100\%$, 其中 c_e 与 c_r 分别表示本文测量值和文献参考值。

当采用分层修正方法后,和文献[5]中及在仅考虑接触时的测量结果相比,测量精度有了较大提高;对于乙醇这种易挥发的样品,利用文献 [5]方法及本文仅考虑接触热阻情况下,比热容的测量误差分别为 18.3%和 6.2%,其他几种样品比热容的平均绝对误差也分别为 6.6%和 6%;采用分层修正后,乙醇的测量误差减小到 1.5%,而其他几种样品,比热容的平均绝对误差约为 3%。

因此可以得出结论,无论对于性质稳定的液体样品还是固体样品,接触热阻对比热容测量精度的影响不大,但是采用适当的分析方法,如本文所提出的分层修正方法,则可以使得其比热容的测量精度得到较大地提高。

3 结论

本文基于考虑接触热阻影响的热探针导热微分方程的精确解,利用蒙特卡罗和分层修正方法,建立了利用热探针测量热导率、比热容等热物性参数的新方法.利用该方法分别对液体和固体的热导率、比热容等热物性参数进行了测量和分析.主要结论如下:

(I) 本方法无论对于固体还是液体,都具有较高的热导率测量精度,对于甘油、硅油、乙二醇的测量误差均在 1%以内,对 3 种陶瓷沙的测量误差在 2%以内,即使对于乙醇这种易挥发的液体,其测量误差也仅为 2.4%;

(II) 本文的测量结果显示,比热容的平均测量误差为 2.6%,这表明,利用分层修正方法,可以使得比热容的测量精度大幅提高;

(III) 接触热阻对固体热导率的测量结果具有较大影响,但是对比热容和液体热导率的影响不大。

参考文献(References)

- [1] 陈则韶,葛新石,顾毓沁.量热技术和热物性测定[M].合肥:中国科学技术出版社,1990:79-81.
- [2] Xu Qiang, Tong Mingwei. The fluid thermal conductivity measurement by the transient hot-wire technique [J]. Applied Energy Technology, 2006, (4): 1-4.
徐强,童明伟.液体导热系数的瞬态双热线测量[J].应用能源技术,2006,(4):1-4.
- [3] Xie Huaqing, Wang Jinchang, Cheng Shuxia, et al. A

fine needle probe for determining the thermal conductivity of penetrable materials [J]. Journal of Applied Sciences, 2002, 20(1): 6-9.

谢华清,王锦昌,程曙霞,等.热探针测量材料导热系数研究[J].应用科学学报,2002,20(1):6-9.

- [4] Chen Zeshao, Li Chuan, Cheng Wenlong, et al. A new thermal probe method for determining thermal conductivity based on the minimal dispersion of thermal diffusivity [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2000, 30(3): 312-317.
陈则韶,李川,程文龙,等.据热扩散最小离散度确定导热系数的新热探针法[J].中国科学技术大学学报,2000,30(3):312-317.
- [5] Cheng Wenlong, Zhang Hongze, Zhao Rui. A new method of thermal probe for thermal conductivities measurement based on Monte Carlo inversion [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 34(8): 414-418.
程文龙,张宏泽,赵锐.基于蒙特卡罗反演的热探针导热系数测量方法[J].中国科学技术大学学报,2008,34(8):414-418.
- [6] Zhao Huizhong, Liu Zhenyan, Zhang min, et al. The measurement of compound adsorbent thermal conductivity of used by thermal probe [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(3): 437-441.
赵惠忠,刘震炎,张敏,等.瞬时热探针法测量沸石复合吸附剂导热系数[J].上海交通大学学报,2007,41(3):437-441.
- [7] Chen Kunjie, Gong Hongju, Experiment measurement of the thermal conductivity of paddy by a tin heat probe [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 65-67.
陈坤杰,龚红菊.基于非稳态热探针法的稻谷导热系数的测定[J].农业机械学报,2005,36(1):65-67.
- [8] Cheng Wenlong, Liu Na, Zhong Qi, et al. Heat satellite model updating method [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 270-275.
程文龙,刘娜,钟奇,等.卫星稳态热模型参数修正方法研究[J].宇航学报,2010,31(1):270-275.
- [9] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids [M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1986: 342-344.
- [10] 程文龙.关于三相系砾岩油藏导热系数的推算研究与软件编制[D].合肥:中国科学技术大学,1996.
- [11] 程能林.溶剂手册[M].第三版.北京:化学工业出版社,2002:975-977.