

## Measurement method and application of thermophysical properties of solid materials based on enantiomorphous heat-source principle

Qinghua CHEN<sup>1\*</sup>, Guoyong SU<sup>1</sup>, Yangbin MA<sup>2</sup>, Kuosheng JIANG<sup>1</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China

2. School of Materials Science, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany D-64287

**Abstract:** Based on the parallel hot-wire method and the principle of enantiomorphous heat-source, a new model for measuring the thermophysical parameters of solid materials was proposed. On the basis of the principle of hotline test, the existence of virtual mirror heat-source at the symmetrical position of the real heat-source was taken as the boundary of the adiabatic boundary of the specimen, so as to eliminate the influence of the heat accumulation effect caused by the adiabatic boundary. Therefore, the test can no longer limit the experimental time and sample thickness. When the calculation results of the thermal physical parameters in the adjacent time were greater than that of the criteria proposed, the mirror heat-source was introduced to correct the calculated temperature. In order to avoid the dependence of the thermal physical parameters on the calculated value at the initial stage of the experiment, the measured temperature was corrected by the model two times. Asbestos as the research object, through the theoretical analysis combined with numerical calculation, shows that there was a difference between the two correction results, but the difference was not large and the second correction of the thermophysical parameters of the calculation results more stable. The thermal property test applied to the asbestos board, marble, borosilicate glass, silica brick and other 4 kinds of thin and thick material. The results showed that it was consistent with the measured values of other methods in the literature, and the maximum error was less than 5%. This test method was validated for the thin plate samples and thick plate samples, effectively improving the hot wire method test accuracy and expanding the scope of application. .

**Key words:** solid material; thermo-physical parameters; parallel hot-wire method; enantiomorphous heat-source; measurement system

收稿: 2018-01-10, 修回: 2018-03-26, 网络发表: 2018-04-26, Received: 2018-01-10, Revised: 2018-03-26, Published online: 2018-04-26

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(编号: 1408085ME107); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2014M561807); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(编号: gxyqZD2016087)

作者简介: 陈清华(1978-), 男, 安徽省宿州市人, 博士, 教授, 主要从事材料热物性测试方法研究, E-mail: ahhnds@163.com.

**引用格式:** 陈清华, 苏国用, 马杨斌, 等. 基于镜像热源原理测定固体材料热物性的方法及应用. 过程工程学报, 2018, 18(4): 735-742.  
Chen Q H, Su G Y, Ma Y B, et al. Measurement method and application of thermophysical properties of solid materials based on enantiomorphous heat-source principle (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 735-742, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218109.

# 基于镜像热源原理测定固体材料热物性的方法及应用

陈清华<sup>1\*</sup>, 苏国用<sup>1</sup>, 马杨斌<sup>2</sup>, 姜阔胜<sup>1</sup>

1. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001

2. 达姆施塔特工业大学材料科学学院, 德国 达姆施塔特 D-64287

**摘 要:** 基于平行热线法结合镜像热源原理, 提出了一种新的固体材料热物性参数测算模型, 在热线法测试原理的基础上, 以试样绝热边界为界线, 设与真实热源对称位置处存在虚拟镜像热源, 以此消除绝热边界造成的热积聚效应影响, 测试时可不需再限制实验时间和试样厚度. 当相邻时刻材料的热物性参数计算结果大于判别准则时, 引入镜像热源对计算温度进行修正. 为防止修正过程所用热物性参数对实验初期计算值的依赖, 模型对实测温度进行两次修正. 以石棉板为研究对象, 理论分析结合计算结果表明, 两次修正结果不同, 但差异不大, 且第二次修正后各组热物性参数计算结果更稳定. 对石棉板、大理石、硼硅玻璃、硅砖等 4 种材料的薄板和厚板进行了热物性测定, 结果与文献值较吻合, 最大误差均小于 5%, 验证了本测定方法适用于薄板和厚板试样, 有效提升了热线法测定精度, 扩大了应用范围.

**关键词:** 固体材料; 热物性参数; 平行热线法; 镜像热源法; 测定系统

**中图分类号:** O551.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2018)04-0735-08

## 1 前言

随着我国对节能减排的日益重视, 各种新型材料层出不穷, 材料热物性参数测定方法的研究受到持续关注, 有了很大发展<sup>[1-6]</sup>. 现有测定方法中, 非稳态热线法因测定效率较高而应用广泛<sup>[7-9]</sup>, 是耐火材料和非金属固体材料热导率的标准测定方法<sup>[10,11]</sup>. 但为满足热线法原理模型的无限大介质条件, 要求试样尺寸不小于 200 mm×100 mm×50 mm, 若试样厚度不够, 则需采用熔融手段加厚, 因而测定厚度较薄或导热系数较大的材料时精度难以保证. 文献[12]基于平行热线法原理, 通过自动判断有效测定时间, 消除绝热边界热量积聚效应的影响, 计算各种厚度试样的热物性, 但试样较薄同时导热性能较差时, 会因有效测定时间过短, 得到的有效测定数据较少, 最终所测热物性参数精度较差或无法得到参数. 针对此问题, 本研究在非稳态平行热线法原理的基础上, 利用镜像热源法<sup>[13]</sup>处理绝热边界, 考虑因边界热量积聚引起的过热问题, 建立了新的数学模型, 并研制了热物性测定系统, 使热线法测定耐火材料和非金属固体材料的热物性参数不受试样尺寸和测定时间限制, 扩大了其应用范围, 利用该系统对石棉板、大理石、硼硅玻璃、硅砖等进行热物性测定, 这 4 种材料的导热系数为 0.1~2.7 W/(m·K), 较全面覆盖了耐火材料和非金属固体材料的属性, 可验证本测定方法的代表性和普适性.

## 2 物理模型及数学方法

### 2.1 物理模型

如图 1 所示, 一个线热源  $Q$  具有恒定功率  $q$ , 位于试样中间, 试样上表面和侧面均覆盖有绝热材料. 设试样尺寸足够大或无穷大, 则热线温升可表示为<sup>[12]</sup>

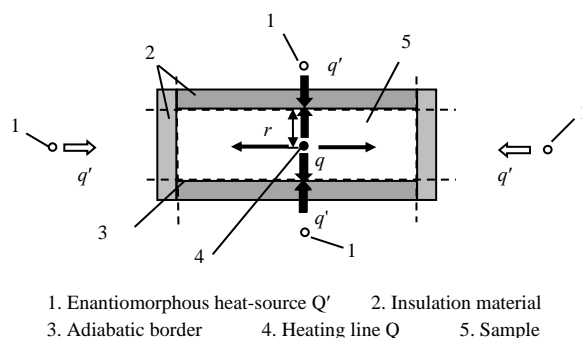
$$\Delta T(\tau) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ -E_i \left( \frac{-r^2}{4\alpha\tau} \right) \right], \quad (1)$$

式中,  $\Delta T(\tau)$  为  $\tau$  时刻与线热源距离为  $r$  的真实热源引起点  $M$  的温升(°C),  $q$  为单位长度线热源的功率(W/m),  $\lambda$  和  $\alpha$  分别为固体介质的热传导率[W/(m·K)]和热扩散率(m<sup>2</sup>/s),  $E_i$  为指数积分,  $r$  为测点与线热源之间的距离(m).

但实际试样尺寸有限, 热量传递至边界后大部分积聚, 造成实际温升大于理论温升. 对此, 文献[14]提出将绝热边界设想成一面镜子, 在与真实热源  $Q$  对称的位置设一个镜像热源  $Q'$ , 二者在绝热边界处产生的热流量沿绝热面方向相反, 绝热材料导热系数为 0 时, 镜像热源的强度等于真实热源( $q=q'$ ), 但通常由于绝热材料不可能完全绝热,  $q'$  往往小于  $q$ . 如图 2 所示, 试样任意一点  $M$  距绝热边界的距离为  $r_M$ , 温升  $\Delta T_M(\tau)$  可视为由真实、镜像热源共同引起, 即

$$\Delta T_M(\tau) = \Delta T(\tau) + \Delta T'(\tau), \quad (2)$$

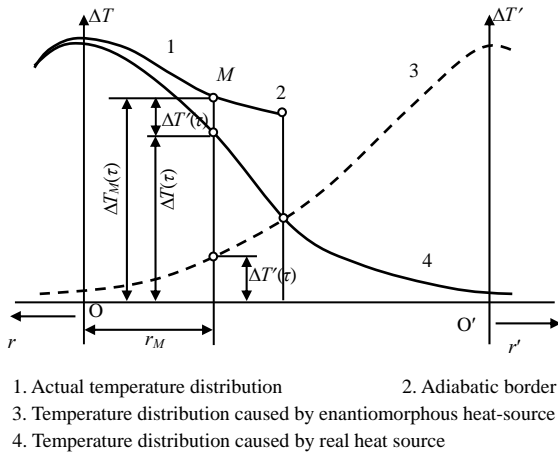
式中,  $\Delta T'(\tau)$  为镜像热源引起的点  $M$  的温升(°C).



1. Enantiomorphic heat-source  $Q'$  2. Insulation material  
3. Adiabatic border 4. Heating line  $Q$  5. Sample

图 1 绝热边界的处理

Fig.1 The treatment of adiabatic boundary

图2 具有绝热边界的 $\Delta T-r$ 图Fig.2  $\Delta T-r$  diagram with adiabatic boundary

当试样周围绝热边界为多个时, 将存在多个镜像热源, 且同一种绝热材料各镜像热源强度相同, 均为  $q'$ , 区别在于距真实热源的距离不同(图 1), 则试样任意一点  $M$  的实际温升可表示为

$$\Delta T_M(\tau) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ -E_i \left( \frac{-r^2}{4\alpha\tau} \right) \right] + \frac{q'}{4\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ -E_i \left( \frac{-r_n^2}{4\alpha\tau} \right) \right], \quad (3)$$

$$\text{其中, } \frac{q'}{4\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ -E_i \left( \frac{-r_n^2}{4\alpha\tau} \right) \right] = \Delta T'(\tau), \quad (4)$$

式中,  $r_n$  为第  $n$  个镜像热源距作用点  $M$  的距离。

因此, 由真实热源引起的  $M$  点温升可由镜像热源修正实测温度而得, 可表示为

$$\Delta T_M(\tau) - \frac{q'}{4\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ -E_i \left( \frac{-r_n^2}{4\alpha\tau} \right) \right] = \Delta T(\tau), \quad (5)$$

令  $p=r/[2(\alpha\tau)^{1/2}]$ , 则

$$f(p) = \frac{\Delta T(2\tau)}{\Delta T(\tau)} = \frac{-E_i(-r^2/8\alpha\tau)}{-E_i(-r^2/4\alpha\tau)} = \frac{\Omega(2^{1/2}/2p)}{\Omega(p)}, \quad (6)$$

式中,  $\Omega(p)$  可展开成以下形式<sup>[14]</sup>:

$$\Omega(p) = -\frac{1}{2} E(-p^2) = \frac{1}{2} \left[ -0.57721 - \ln p^2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n p^{2n}}{nn!} \right]. \quad (7)$$

试算表明, 取式(7)展开项的前 6 项即可满足精度要求, 进而可利用计算机编程求解。因此, 通过式(4)~(7)可计算修正后的  $\Delta T(\tau)$ , 根据式(1)可得导热系数  $\lambda$ 。

确定  $\Delta T_n(2\tau)/\Delta T_n(\tau)$  后,  $-E_i(-r^2/4\alpha\tau)$  可查表<sup>[10]</sup>得到, 从而得出  $\lambda$ , 进而由  $\Omega(p2^{1/2}/2)/\Omega(p)$  得出热扩散率  $\alpha$ 。

## 2.2 数学方法

若被测试样长度和宽度远大于厚度, 侧向绝热边界对应的镜像热源对温升贡献将非常小, 可以忽略, 因此

可只考虑厚度方向镜像热源的影响。如图 3 所示, 被测物料具有  $AA'$  和  $BB'$  绝热边界, 厚度为  $H$ , 存在持续线热源  $Q_0$  (与绝热边界  $AA'$  的距离为  $b$ ), 则以  $AA'$  边界为对称轴的镜像热源为  $Q'_1, Q'_3, \dots$ , 以  $BB'$  边界为对称轴的镜像热源为  $Q'_2, Q'_4, \dots$ , 根据镜像对称原理, 各镜像热源距相应对称轴的距离  $R_n$  可表示为

$$R_n = \begin{cases} b & (n=1) \\ 2H-b & (n=2) \\ [(n-1)/2+1]H-b & (n=3, 5, 9, \dots) \\ (n/2-1)H+b & (n=4, 6, 8, \dots) \end{cases} \quad (8)$$

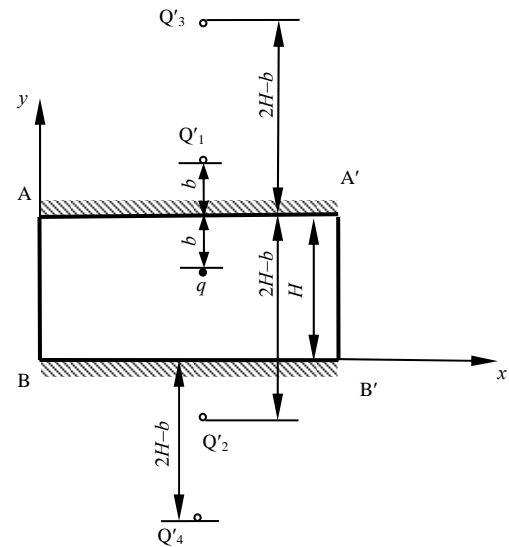


图3 镜像热源分布示意图

Fig.3 Schematic diagram of mirror heat source distribution

当热源在试样中间即  $H=2b$  时, 各镜像热源对试样绝热边界  $AA'$  上作用点的距离  $r_n$  可表示为

$$r_n = \begin{cases} b & (n=1) \\ 3b & (n=2) \\ 2b[(n-1)/2+1]-b & (n=3, 5, 9, \dots) \\ 2b(n/2-1)+3b & (n=4, 6, 8, \dots) \end{cases} \quad (9)$$

由于绝热边界对热量具有积聚效应, 镜像热源引起作用点处的温升  $\Delta T'_n(\tau)$  需满足:

$$\Delta T'_n(\tau) > 0. \quad (10)$$

理论上镜像热源有无数个, 但由于热传导的阻尼性和延迟性, 较远距离的镜像热源对待求点的温升作用非常小<sup>[15]</sup>, 本研究将对作用点温升影响较大的镜像热源定义为有效镜像热源。同时, 绝热边界在真实热源工作初期没有热量积聚, 即镜像热源与真实热源作用并非同步。本工作利用判别准则  $\Delta T'_n(\tau) > 0$ , 在实验过程中实时计算

有效镜像热源个数及作用强度. 基于镜像热源原理的固体材料热物性, 计算模型工作流程如图4所示.

(1) 根据在试样绝热边界AA'上测点M测得实际升温数据, 通过式(6), (7)和(1)并通过查表, 分别计算出一段时间内多组热物性参数 $\lambda_m$ 和 $\alpha_m$  ( $m=0, 1, \dots, k$ ).

(2) 比较相邻时刻热物性计算值 $\lambda_m$ 和 $\lambda_{m+1}$ , 计算两者的平均值 $\bar{\lambda}$ , 用相对偏差 $\Delta\lambda_{dm} = |\bar{\lambda} - \lambda_{m+1}| / \bar{\lambda}$ 判断物性参数是否受绝热边界的影响, 当相对偏差 $\Delta\lambda_{dm}$ 大于计算的精度 $\varepsilon$ 时, 则需引入镜像热源对测定温度进行修正.

(3) 偏差是热量积聚引起的, 因此需修正 $\lambda_{m+1}$ , 则需先修正 $T_{m+1}$ 和 $T_{2(m+1)}$ . 为防止对同一温度 $T_{m+1}$ 重复修

正, 对温度 $T_{m+1}$ 进行判断.

(4) 在步骤(3)中对计算温度进行修正时, 取步骤(1)中满足测算标准物性参数的平均值 $\bar{\lambda}$ 和 $\bar{\alpha}$ 代入式(4)和(10), 通过查表计算出修正后的 $\lambda_{m+1}$ , 再通过对比检验是否满足 $\Delta\lambda_{dm} < \varepsilon$ , 若仍不满足则继续修正, 重复步骤(3), 直到满足要求, 修正结束.

(5) 进行下一组热物性参数检验

为防止在处理镜像热源所需参数时对前期所测物性参数的依赖, 在修正后取导热系数和热扩散率的平均值作为镜像热源处理的物性参数, 重复以上步骤, 对所测温度进行二次修正.

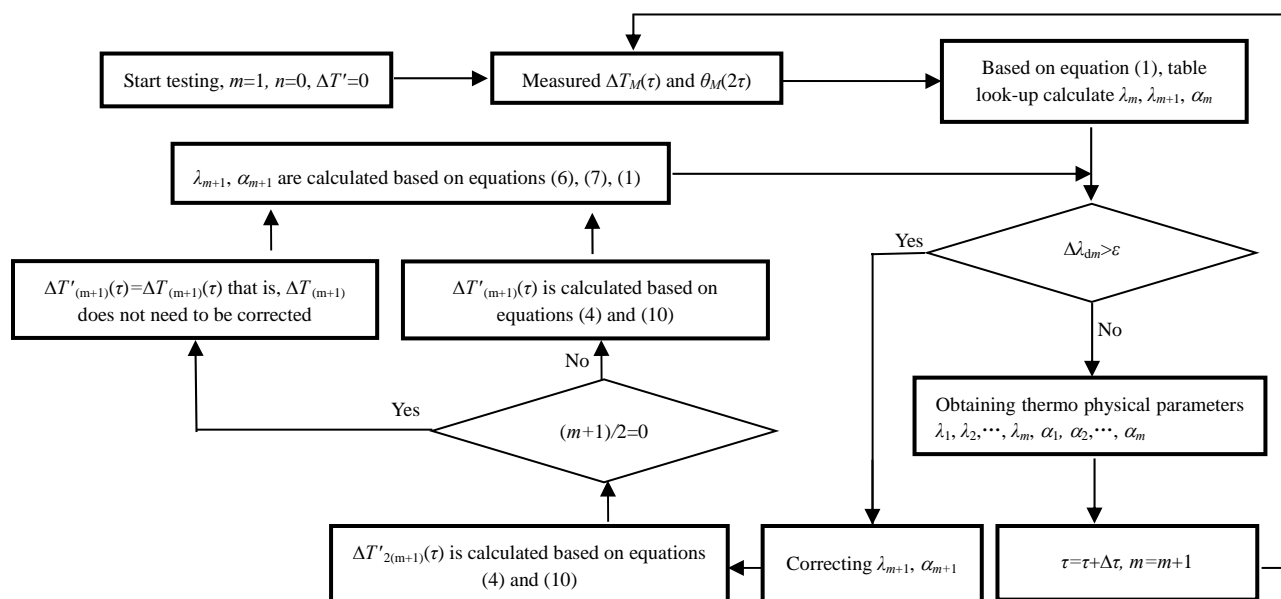


图4 基于镜像热源原理的固体材料热物性计算模型工作流程

Fig.4 Flowchart of thermal material measurement model for solid materials based on the enantiomorphous heat-sources principle

### 3 实验

#### 3.1 实验装置

设计了如图5所示的固体材料热物性测定系统, 主要由试样盒、加热线、稳压电源、测温热电偶、数据采集模块和计算机等构成, 测温热电偶均为TT-T-30-SLE型, 测温范围 $-276 \sim 260^\circ\text{C}$ , 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 实验模块的分辨率为 $0.01^\circ\text{C}$ . 试样盒和上端盖内侧均铺设一层绝热材料, 被测试样置于试样盒中. 通过稳压电源控制加热线实现恒温加热, 加热线由直径 $\delta=0.1\text{ mm}$ 的镍铬电阻丝制成, 由于 $\delta$ 与试样厚度 $H$ 相比较小, 可认为热源在试样底部直接加热. 上位机则根据采集的温度信号, 通过查表并结合程序化公式计算试样热导率及热扩散率, 测定系统如图6所示.

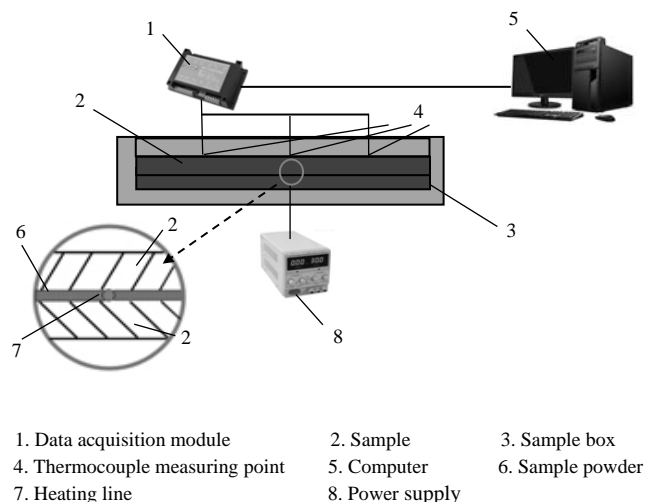


图5 测试系统结构原理图

Fig.5 Schematic diagram of the test system structure

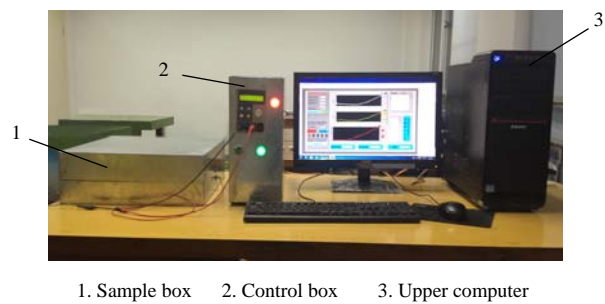


图 6 测试系统  
Fig.6 Test system experiment diagram

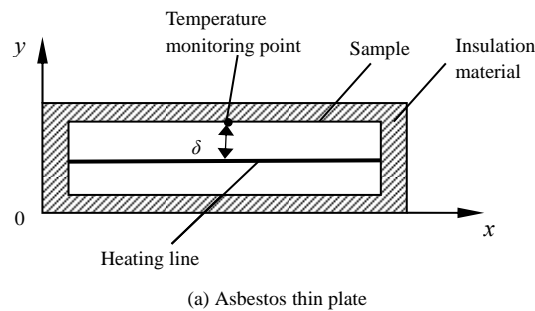
3.2 实验结果与分析

3.2.1 有效镜像热源实验

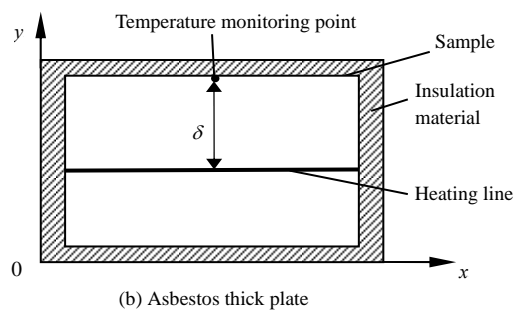
选择长×宽为 200 mm×200 mm、厚 6 mm 的石棉板为试样, 密度为 800 kg/m<sup>3</sup>, 实验温度 27 ℃. 建立薄板计算模型[图 7(a), 板厚 6 mm]和厚板计算模型[图 7(b), 将 8 块 6 mm 的薄板叠放在一起, 在试样边界沿厚度方向涂抹密封胶, 保证薄板间无间隙, 形成厚 48 mm 的厚板]. 将热线置于一块试样的上表面中间位置, 再覆盖一块试样, 两块试样中间的缝隙用磨细的试样粉末填充. 测温热电偶置于热线正上方试样块的上表面, 实验箱体

内侧包有厚 50 mm、导热系数 0.035 W/(m·K)的陶瓷纤维毯绝热材料, 且保证绝热材料与试样紧密接触. 实验过程中热量几乎不能穿过绝热材料, 基本满足绝热边界要求, 该实际边界不会对实验结果带来误差.

由于所用绝热材料导热系数小且有一定厚度, 因此镜像热源的强度近似于实际热源强度. 石棉板薄板与厚板两次修正的有效镜像热源数、作用时间和作用温升如表 1 和 2 所示. 可以看出两次修正引入的有效镜像热源数、作用时间及修正温升有较大差异, 尤其是石棉薄板引入镜像热源两次修正的温度在 180~420 s 间差异最大, 随修正时间延长, 两次修正的温度趋于一致, 原因可能是刚开始计算时引入的热物性参数存在差异, 随修正时间延长, 修正的热物性参数越来越接近真实值, 从而两次修正后计算的温度与初始温度之差相差不大. 而石棉厚板两次修正后计算的温度与初始温度之差比石棉薄板明显减小. 原因是石棉厚板较厚, 加热功率不大, 为 25.2 W/m, 温度采样周期 $\Delta\tau=10$  s, 设定测算精度 $\varepsilon=5\%$ , 边界热量积聚效应不显著, 因此, 镜像热源修正计算温度时两次结果较一致.



(a) Asbestos thin plate



(b) Asbestos thick plate

图 7 计算模型  
Fig.7 Simulation model

表 1 石棉薄板镜像热源第一、二次修正结果  
Table 1 The first and second revisions of enantiomorphous heat-source of asbestos thin plate

Computation time, t/s	Number of enantiomorphous heat-source, n		Effective time, t/s		Temperature rise, $\Delta T/^\circ\text{C}$	
	First	Second	First	Second	First	Second
1~120	0	0	0	0	0.00	0.00
180	1	0	5	0	0.32	0.00
240	1	1	8	8	1.05	0.74
300	1	1	11	12	1.56	1.74
360	1	1	15	15	2.62	2.42
420	2	1	20	18	3.83	3.14
480	2	2	29	28	6.37	5.97
540	2	2	40	41	8.93	8.82
600	3	3	48	49	10.68	10.84

表 2 石棉厚板镜像热源第一二次修正结果  
Table 2 The first and second revisions of enantiomorphous heat-source of asbestos thick plate

Computation time, t/s	Number of enantiomorphous heat-source, n		Effective time, t/s		Temperature rise, $\Delta T/^\circ\text{C}$	
	First	Second	First	Second	First	Second
1~4500	0	0	0	0	0.00	0.00
4500	1	1	400	380	0.50	0.46
4800	1	1	410	400	0.52	0.50
5100	1	1	450	440	0.69	0.67
5400	1	1	460	460	0.73	0.73
5700	1	1	530	520	1.05	0.96
6000	1	1	550	560	1.11	1.06
6300	1	1	600	620	1.32	1.41
6600	1	1	630	660	1.54	1.58
6900	1	1	680	680	1.52	1.68
7200	1	1	770	780	2.10	2.16

图 8 分别为石棉薄板和厚板的实测温度和镜像热源修正后的计算温度. 由图 8(a)可见, 实验初期(小于 180

s), 薄板的实测温度与计算温度几乎重合, 但之后因热量积聚效应逐渐明显, 温升实测值与计算值差距增大,

600 s 时已超过 10℃, 两次修正后的温度分别为 44.6 和 44.3℃, 降幅约为 19%. 图 8(b)显示, 厚板的实测温度与两次修正后的计算温度偏差较小, 进一步表明厚板边界热量积聚效应对边界处测点的温升影响较小.

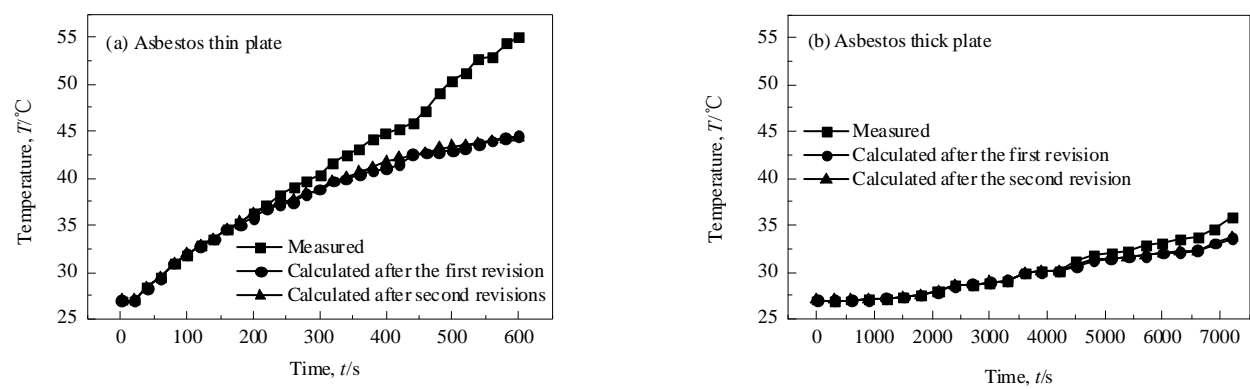


图 8 石棉板实测和计算温度  
Fig.8 The measured and calculated temperatures of asbestos plate

表 3 石棉板的热导率和热扩散率实测值和 2 次修正后的计算结果  
Table 3 Thermal conductivity and thermal diffusivity of measured and calculated values after the first and second revisions of asbestos plate

Time, <i>t</i> /s	Temperature rise, $\Delta T/^{\circ}\text{C}$			$f(p)$			$-E_i(-p^2)$		
	Measured	First revision	Second revision	Measured	First revision	Second revision	Measured	First revision	Second revision
40	1.30	1.30	1.30	3.02	3.02	3.02	0.138	0.1380	0.138
60	2.40	2.40	2.40	2.41	2.41	2.41	0.258	0.2580	0.258
80	3.93	3.93	3.93	1.95	1.95	1.95	0.4868	0.4868	0.4868
100	4.91	4.91	4.91	1.79	1.79	1.89	0.5402	0.5402	0.537
120	5.78	5.78	5.78	1.75	1.75	1.81	0.6900	0.6900	0.6173
140	6.52	6.52	6.52	1.74	1.74	1.74	0.7030	0.7030	0.7034
160	7.58	7.58	7.58	1.67	1.67	1.66	0.8089	0.8089	0.8259
180	8.32	8.00	8.32	1.93	1.68	1.64	0.5025	0.7924	0.8616
200	9.23	8.77	9.28	1.94	1.60	1.59	0.4944	0.9405	0.9619
220	10.10	9.80	9.91	1.87	1.59	1.56	0.5555	0.9619	1.031
240	11.20	10.15	10.46	1.98	1.55	1.55	0.4639	1.0557	1.0557
260	12.10	10.52	10.80	2.00	1.55	1.53	0.4496	1.0557	1.1081
280	12.65	11.31	11.34	2.05	1.50	1.50	0.4168	1.1945	1.1945
300	13.40	11.84	11.70	2.10	1.48	1.48	0.3873	1.2582	1.2582
1500	0.90	0.90	0.90	3.46	3.46	3.46	0.0957	0.0957	0.0957
2100	1.52	1.52	1.52	2.81	2.81	2.82	0.1676	0.1676	0.166
2700	1.67	1.67	1.67	3.17	2.73	2.73	0.1208	0.1816	0.1816
3300	2.1	1.92	1.92	3.25	2.63	2.61	0.1130	0.2015	0.2058
3600	2.91	2.10	2.10	3.01	2.52	2.50	0.1389	0.2273	0.2325

Time, <i>t</i> /s	Thermal diffusivity, $\alpha/(\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})$			Thermal conductivity, $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$			Relative deviation of $\lambda$ , $\Delta\lambda_d/\%$		
	Measured	First revision	Second revision	Measured	First revision	Second revision	Measured	First revision	Second revision
40	1.748	1.748	1.748	0.106	0.106	0.106	—	—	—
60	1.658	1.658	1.658	0.108	0.108	0.108	0.93	0.93	0.93
80	1.987	1.987	1.987	0.107	0.107	0.107	0.47	0.47	0.47
100	1.742	1.742	1.733	0.111	0.111	0.110	1.83	1.83	1.38
120	1.841	1.841	1.646	0.119	0.119	0.107	3.49	3.49	1.38
140	1.609	1.609	1.611	0.108	0.108	0.108	4.85	4.85	0.47
160	1.641	1.641	1.683	0.107	0.107	0.109	0.47	0.47	0.46
180	1.901	1.425	1.570	0.061	0.099	0.104	27.38	3.88	2.35
200	1.675	1.572	1.617	0.054	0.107	0.104	—	3.88	0.00
220	1.781	1.47	1.609	0.055	0.098	0.104	—	4.39	0.00
240	1.288	1.522	1.522	0.042	0.104	0.101	—	2.97	1.46
260	1.144	1.405	1.502	0.037	0.101	0.103	—	1.46	0.98
280	0.971	1.553	1.553	0.331	0.106	0.106	—	2.42	1.44
300	0.833	1.556	1.566	0.185	0.107	0.108	—	0.47	0.93
1500	1.797	1.797	1.797	0.107	0.107	0.107	—	0.00	0.47
2100	2.061	2.061	2.051	0.111	0.111	0.110	—	1.83	1.38
2700	2.262	1.914	1.914	0.073	0.109	0.109	—	0.91	0.46
3300	1.777	1.827	1.849	0.054	0.105	0.107	—	1.87	0.93
3600	1.855	1.783	1.808	0.048	0.109	0.111	—	1.87	1.83

3.2.2 材料热物性测定

表 3 为石棉板实测温升、基于本模型第一次与第二次修正后计算的热物性参数及最终结果。热线加热至 30 s 时检测到温度变化, 为避免传感器初期采集的数据不稳定给计算结果带来误差, 取石棉薄板在 40~300 s 和石棉厚板在 1500~3600 s 的热物性参数计算。被测试样放在试样盒中, 试样表面包裹有绝热材料, 因此, 实验环境温度波动对试样测点温度影响很小, 可忽略。

对比表 3 可以看出, 实验前期(薄板 180 s 内, 厚板 2700 s 内)修正后计算的石棉导热系数相同, 但随实验时间延长, 直接由实测温度计算的导热系数发生了突变, 且之后的计算结果均与实验初期测定值相差很大, 表明此时测点温度已受绝热边界热积聚影响, 对计算结果产生了影响。两次修正后计算的热导率基本一致, 但第 2 次计算的相邻时刻热导率偏差较第 1 次小, 整体计算值较稳定, 因此, 取表中第 2 次计算的热物性参数的平均值作为最终结果, 则被测试样热导率和热扩散率分别为 0.107 W/(m·K)和  $1.71\times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s。文献[16]采用平板法计算的石棉热导率为 0.112 W/(m·K), 热扩散率为  $1.73\times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, 与本计算结果较吻合。

由此可见, 本工作基于平行热线法结合镜像热源原理建立的模型可计算比国家标准更薄试样的热物性参数, 也可计算一般厚度的标准试样的热物性参数。传统

的平行热线法直接计算, 会随时间增加受到边界热积聚效应的影响, 对计算结果影响较大, 必须严格限定时间。本模型通过镜像热源原理分析试样绝热边界的热量积聚效应, 对实测温度进行修正, 消除了绝热边界条件的影响, 使热物性计算不受时间限制, 扩大了平行热线法的应用范围。

为进一步验证本模型的计算精度, 分别对大理石、硼硅玻璃(Pyrex7740)和硅砖进行了热物性参数计算, 其中大理石厚 6 mm, 长×宽为 200 mm×200 mm, 密度为 2600 kg/m<sup>3</sup>; 硼硅玻璃厚 6 mm, 长×宽为 200 mm×200 mm, 密度为 2230 kg/m<sup>3</sup>; 硅砖长×宽为 230 mm×173 mm, 厚 10 mm, 密度为 1900 kg/m<sup>3</sup>, 加热功率分别为 94.7, 50 和 40 W/m。同时, 为检验计算的可重复性, 对同一试样在相同条件下进行多次计算, 采用相对偏差 $\Delta d$ 衡量可重复性:

$$\Delta d=|d|/\bar{X}\times 100\%,$$

式中,  $|d|$ 为每次计算值  $X$  与  $n$  次计算值的算术平均的绝对差。对大理石、硼硅玻璃和硅砖试样分别计算 3 次, 可重复性如表 4 所示。可以看出计算的 3 种试样的热导率可重复性较高, 最大相对偏差为 4.29%, 小于 5%, 符合测试系统精度要求。

取各组热物性参数计算结果的平均值作为最终结果, 与文献值的相对偏差如表 5 所示。

表 4 计算结果的可重复性  
Table 4 Repeatable accuracy of calculated results

Material	Thermal conductivity, $\lambda$ /[W/(m·K)]				Relative deviation,		
	Measured value		Average calculated		$\Delta d/\%$		
Marble	2.563	2.725	2.746	2.678	4.29	1.76	2.54
Borosilicate glass	1.273	1.196	1.251	1.240	2.66	3.55	0.89
Silica brick	1.016	1.056	1.039	1.037	2.03	1.83	0.19

表 5 三种材料的计算结果  
Table 5 The calculation results of three materials

Material	Thermal diffusivity, $\alpha$ /( $\times 10^{-7}$ m <sup>2</sup> /s)	Thermal conductivity, $\lambda$ /[W/(m·K)]		Relative error of $\lambda$ , $\Delta\lambda/\%$	Specific heat capacity, $C_p$ /[J/(kg·K)]
		This work	Literature <sup>[12,17]</sup>		
Marble	12.700	2.678	2.700	0.81	816.96
Borosilicate glass	6.178	1.240	1.223	1.39	900
Silica brick	6.421	1.037	1.051	1.33	850

4 结 论

在平行热线法的基础上, 提出用镜像热源处理绝热边界热量积聚的影响, 建立了数学模型, 开发了测定系统, 计算 4 种材料的热物性, 得到如下结论:

(1) 用镜像热源法处理等效处理绝热边界是可行的, 解决了现有测试方法用于较薄或导热系数较小试样时因有效测试时间过短影响测试精度的问题, 拓展了热线法的应用范围。

(2) 不同材料在相同加热功率下, 有效镜像热源对监测点温度的影响差异较大。通过计算镜像热源的温升修正实测温度, 可消除热量积聚效应。

(3) 对 4 种材料进行热物性计算, 结果与文献结果吻合, 计算结果能满足应用要求。

参考文献

[1] Syamsul H, Mamoru N, Agung T W, et al. Contact measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of solid materials: experimental validation of feasibility with a prototype sensor [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2014, 69(2): 256–263.

- [2] César S M, Carlos T, Daniela E, et al. Thermal diffusivity measurements of spherical samples using active infrared thermo-graphy [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2012, 62(7): 469–474.
- [3] Mohammad M R, Rukmani K, Rajam S, et al. Thermal diffusivity measurements on ternary Ge–Te–Ti glasses using photo-thermal detection method: effect of thallium addition [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2012, 358(1): 1501–1505.
- [4] Zhang H, Li M J, Fang W Z, et al. A numerical study on the theoretical accuracy of film thermal conductivity using transient plane source method [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, 72(1): 62–69.
- [5] Flueckiger S, Voskuilen T, Zheng Y, et al. Transient plane source method for thermal property measurements of metal hydrides [J]. *Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference*, 2009, 6(1): 9–12.
- [6] Zhang H, Li Y M, Tao W Q. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2017, 108(1): 1634–1644.
- [7] Grace T C, Salvador C N, Francisco V. Rigid foam polyurethane (PU) derived from castor oil (*Ricinus communis*) for thermal insulation in roof systems [J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2012, 4(1): 348–356.
- [8] Krichler M, Odenbach S. Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2013, 326(1): 85–90.
- [9] Li Y M, Shi C F, Liu J, et al. Improving the accuracy of the transient plane source method by correcting probe heat capacity and resistance influences [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2014, 25(1): 15006–15012.
- [10] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 耐火材料热导率试验方法(热线法): GB/T 5009-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the People's Republic of China. Test method for thermal conductivity of refractory materials (hotline method): GB/T 5009-2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [11] 国家质量技术监督局. 非金属固体材料热导率的测定: 热线法: GB/T 10297-1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- National Quality and Technical Supervision. Non-metallic solid material thermal conductivity determination: hot wire method: GB/T 10297-1998 [S]. Beijing: China Standard Press, 1998.
- [12] 陈清华, 程刚, 庞立, 等. 固体材料热物性参数智能测试系统设计与研制 [J]. *宇航材料工艺*, 2016, 46(2): 57–62.
- Chen Q H, Cheng G, Pang L, et al. Design and development of intelligent test system for thermal material parameters of solid materials [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2016, 46(2): 57–62.
- [13] 侯镇冰. 固体热传导 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 95–97.
- Hou Z B. Solid heat conduction [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984: 95–97.
- [14] 朱法银, 梁碧芝. 井函数及其级数展开 [J]. *大庆石油学院学报*, 1994, 18(1): 114–116.
- Zhu F Y, Liang B Z. Well function and its series expansion [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1994, 18(1): 114–116.
- [15] 王欣, 赵美英, 顾亦磊, 等. 热源温度场叠加法在薄壁结构热分析中的应用 [J]. *中国空间科学技术*, 2007, (3): 64–67.
- Wang X, Zhao M Y, Gu Y L, et al. Application of heat source temperature field superposition method in thin-wall structure thermal analysis [J]. *China Space Science and Technology*, 2007, (3): 64–67.
- [16] 陈清华, 董长帅, 马燕, 等. 基于恒温边界一维非稳态传热模型测量固体材料热物性参数 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(12): 4686–4692.
- Chen Q H, Dong C S, Ma Y, et al. Test thermo-physical properties of solid material based on one dimensional unsteady heat transfer model in constant temperature boundary condition [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(12): 4686–4692.
- [17] 周子民, 朱再兴, 谢东江, 等. 常功率平面热源法测试耐火材料热物性的研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(5): 1467–1472.
- Zhou J M, Zhu Z X, Xie D J, et al. Study on the thermal properties of refractory materials by constant power planar heat source method [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2011, 42(5): 1467–1472.