

稳态热流计法测试技术应用——Application Note: 006

# 耐火隔热材料测试中有效导热系数与真导热系数的相互关系研究

Research on the Relationship Between Effective Thermal Conductivity and True Thermal Conductivity in the Test of Refractory Insulation



[上海依阳实业有限公司](http://www.eyoungindustry.com)

[www.eyoungindustry.com](http://www.eyoungindustry.com)

摘要：本文针对耐火隔热材料导热系数测试中的大温差和小温差这两类主流测试方法，明确了有效导热系数和真导热系数的定义，首次详细描述了这两个参数之间的关系、区别和详细转换方法，明确了这两类主流测试方法的适应范围，从而便于在耐火隔热材料性能评价中选择合适的测试方法，有利于对耐火隔热材料的隔热性能做出准确测试评价，从而保证对隔热材料及结构的正确选择和设计。

关键词：耐火材料、隔热材料、有效导热系数、真导热系数、大温差、测试方法

## 1. 引言

导热系数是评价和使用耐火隔热材料的关键参数，但在实际测试和应用中还存在许多困惑和误区。

耐火隔热材料在实际高温条件下使用时多为板材和管材，隔热材料大多处于一个受热面和背热面温度相差巨大的热环境中。而在材料样品导热系数具体测试中，有些是在模拟实际使用热环境的大温差条件下进行测量，而有些则是在很小温差、甚至没有温差的条件下进行测量，不同的测量导致所得到的结果相差很大，这给耐火隔热材料的性能评价和使用带来很大困扰。

由于技术上的局限性和测试及验证手段不足等原因，耐火隔热材料行业多年来一致对耐火隔热材料导热系数测试方法缺乏准确的理解，对哪种测试方法更能准确表征耐火隔热材料性能并不明确，由此造成测试方法混杂和乱用的现象，使得很多隔热结构设计人员在耐火隔热材料的性能评价和选材中不知该用哪种测试方法，经常会出现误导现象，甚至导致工程应用中出现漏热等重大事故。

为了满足耐火隔热材料在实际工程中的应用，加强对耐火隔热材料导热系数测试的准确了解，规范耐火隔热材料导热系数测试方法的选择，本文首次将耐火材料导热系数测试方法，按照测试过程中样品一维热流方向上的大温差和小温差进行分类，由此分别定义出有效导热系数和真导热系数。通过对这两种导热系数分析、计算和验证，展示出这两种导热系数的区别、相互关系以及可转化性，明确如何正确选择耐火隔热材料测试方法，明确如何正确描述和表达耐火隔热材料的隔热性能，由此实现耐火隔热材料测试评价和选材的规范性。

## 2. 耐火隔热材料导热系数主要测试方法和设备

### 2.1. 测试方法

材料导热系数测试方法主要分为稳态法和瞬态法，对于耐火隔热材料的导热系数测试而言也是如此。但由于耐火隔热材料一般都是在高温下使用，所以相应的测试方法也需要满足高温要求。由此，目前国内外也仅有限几种方法可用于耐火隔热材料高温条件下的导热系数测试，如图 2-1所示。

分类	测试方法名称	相应标准
稳态法	热流计法	GB/T 10295 ; ASTM C518、C201、
	保护热板法	GB/T 10294 ; ASTM C177
	准稳态法	ASTM E2584
瞬态法	热线法	GB/T 5990 ; ASTM C1113
	闪光法	GJB 1201.1 ; ASTM E1461

图 2-1 耐火隔热材料高温导热系数测试方法分类

采用以上测试方法进行耐火隔热材料的测试设备如下：

## 2.2. 测试设备

### 2.2.1. 稳态热流计法高温导热系数测试仪器

稳态热流计法高温导热系数测试仪器依据 GB/T 10295、ASTM C201 和 ASTM C518 标准测试方法，是一种标准的稳态法导热系数测试设备。稳态热流计法高温导热系数测量原理如图 2-2 所示，当水平放置的被测平板状样品上下热面和冷面处在恒定温度时，在被测样品的中心区域和热流测量装置的中心区域会建立起类似于无限大平板中存在的一维稳态热流。通过测量热流密度、试样的热面和冷面温度以及试样厚度则可获得被测试样的导热系数。稳态热流计法高温导热系数测试仪器图 2-3 所示。

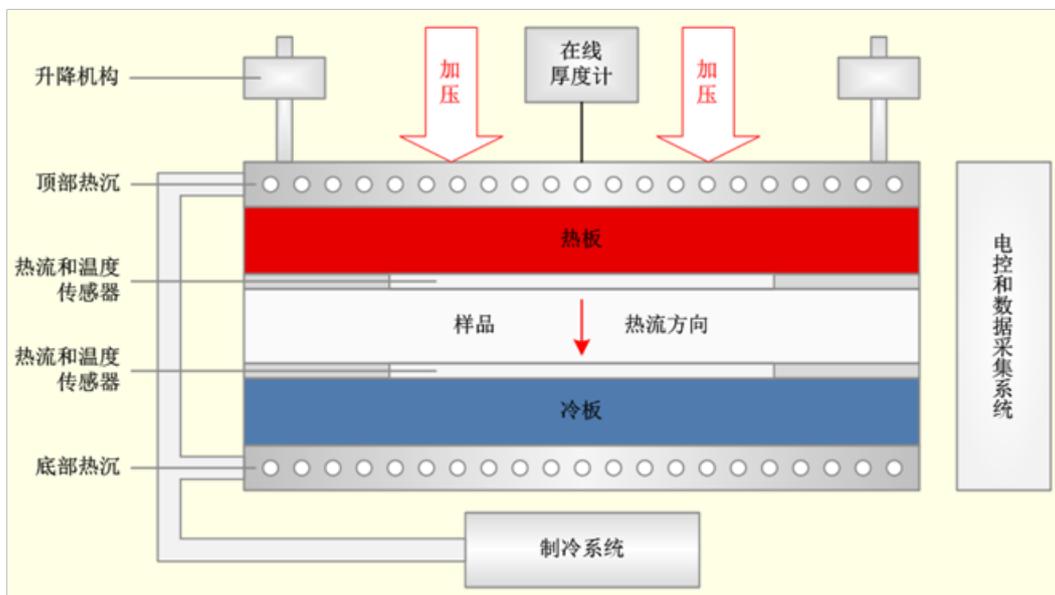


图 2-2 热流计法高温导热系数测量装置原理图

与其它测试方法相比，稳态热流计法高温导热系数测试方法及其仪器最显著特点就是测试条件可以模拟耐火隔热材料在各种实际工程中的应用环境，稳态热流计法是目前唯一能模拟出实际工程隔热环境的测试方法，在被测样品上能够建立起工程实际应用中的隔热大温差，即温度样品冷面可以控制在室温 ~ 50°C 以下，而样品热面温度则可以达到 1500°C 以上的高温。



图 2-3 上海依阳公司热流计法高温导热仪

### 2.2.2. 稳态保护热板法中温导热系数测试仪器

稳态保护热板法导热系数测试仪器依据 GB/T 10294 和 ASTM C177 标准测试方法,是一种标准的稳态法导热系数测试设备。稳态保护热板法导热系数测试原理如图 2-4 所示。保护热板法有单样品和双样品之分,样品置于加热板上,样品 2/3 尺寸大小的热板内布置用于量热的加热丝,其它尺寸外缘部分布置防护加热丝,并有隔离缝,下部是辅助防护加热,这样热板部分的发热量通过样品形成一维稳态热流,均作为热流密度的计算量,因此保护热板法是一种绝对方法。稳态保护热板法高温导热系数测试仪器如图 2-5 所示。

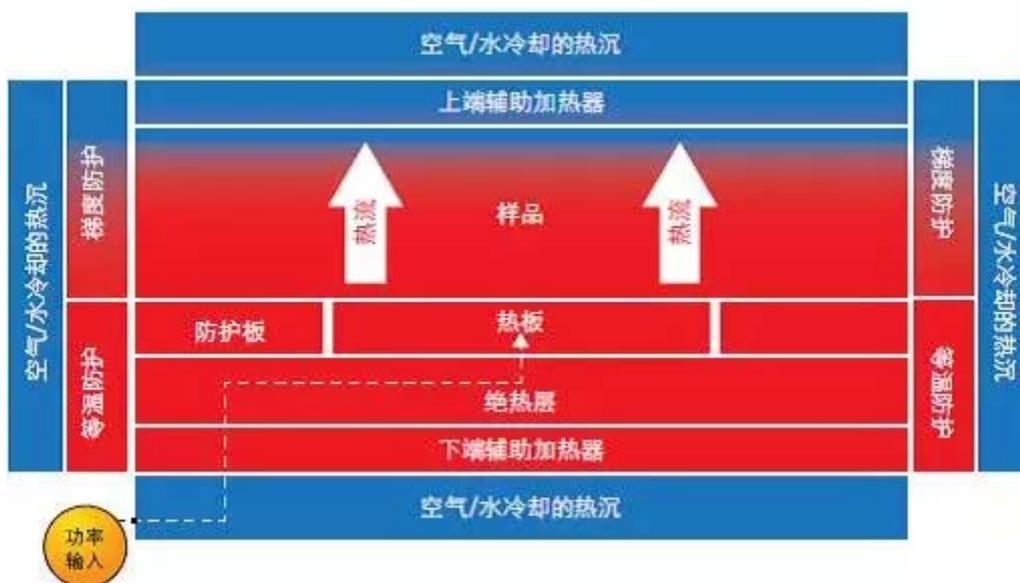


图 2-4 单样品防护热板法测量原理图



图 2-5 德国耐驰公司高温保护热板法分析仪

稳态保护热板法高温导热系数测试方法及其仪器最显著特点就是其测量精度最好，常用于计量和校准标准材料和其它测试仪器，被测样品冷热面温差小，最大不超过  $50^{\circ}\text{C}$ ，但保护热板法测试仪器用于耐火保温材料导热系数测试中的最大问题是测试温度不高，样品热面温度最高只能达到  $600^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.3. 准稳态高温导热系数测试仪器

准稳态导热系数测试技术是一种新型测试方法，准稳态高温导热系数测试仪器依据 ASTM E2584 标准测试方法。准稳态法是一种介于稳态法和瞬态法之间的一种测试方法，准稳态导热系数测试原理如图 2-6 所示。

准稳态法采用的是一维热流加热方式，被测平板状样品在被加热或冷却到一定阶段后，通过试样的热流速度将达到一个缓慢变化状态，也就是准稳态状态，由此可以测量样品在

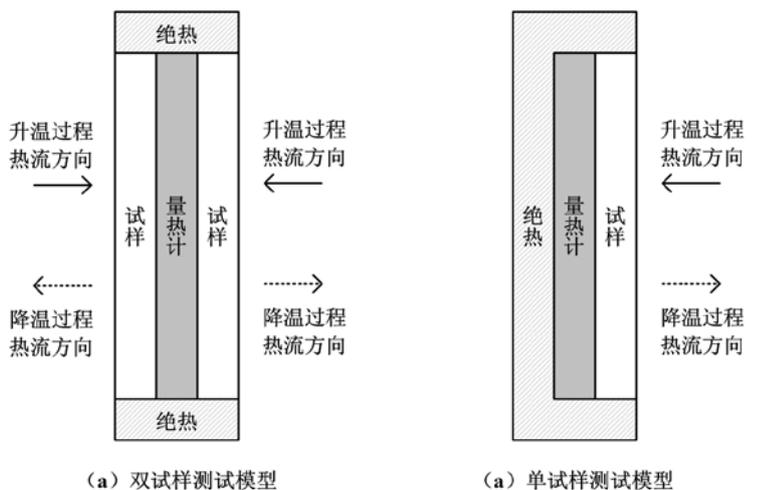


图 2-6 准稳态法导热系数测量原理图

加热和冷却过程中热流随时间的变化速度，通过得到的准稳态条件下的热流和温度变化测试数据，可以准确计算出被测材料的热扩散系数、热容、热焓和导热系数。准稳态法高温导热系数测试仪器如图 2-7 所示。

从原理上讲准稳态法是一种大温差形式的动态测试方法，在试验过程中的测量参数都是试样表面温度变化，不涉及到材料的内部变化，而是将材料的内部变化都看成为一个等效传热过程，因此这种方法可以用于材料在具有相变和化学反应过程中的有效热扩散系数、热容、热焓和有效导热系数测量。

准稳态法的另外一个突出优点在于大大缩短了测试周期，基本可在 36 小时内测试得到一条有效导热系数随温度的变化曲线。



图 2-7 上海依阳公司准稳态法高温导热仪

#### 2.2.4. 瞬态热线法高温导热系数测试仪器

瞬态热线法导热系数测试仪器依据 GB/T 5990 和 ASTM C1133 标准测试方法，是一种标准的瞬态法导热系数测试设备。瞬态热线法导热系数测试原理如图 2-8 所示。

热线法是在样品（通常为大的块状样品）中插入一根热线。测试时，在热线上施加一个恒定的加热功率，使其温度上升。测量热线本身或与热线相隔一定距离的平板的温度随时间上升的关系。热线法高温导热系数测试仪器如图 2-9 所示。

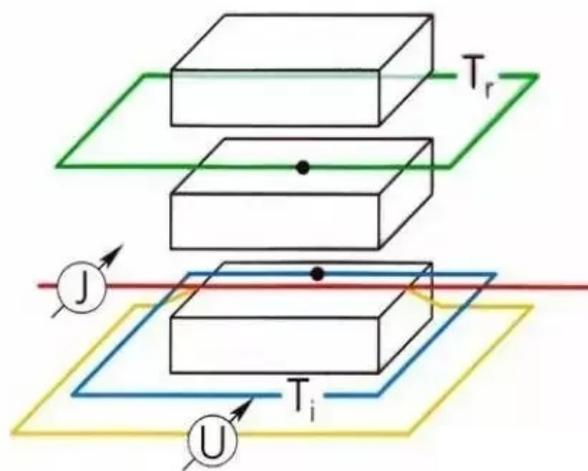


图 2-8 热线法导热仪结构原理图

瞬态热线法高温导热系数测试方法及其仪器最显著特点就是仪器结构简单和测试温度高，可以轻松实现 1400°C 下的高温测试，这也是过去常用的耐火隔热材料导热系数测试方法和仪器。

与上述稳态测试方法相比，瞬态热线法高温导热系数测试方法及其仪器在测试过程中要求被测样品整体温度达到均匀一致后再进行测量，所以瞬态热线法是一种无温差的测试方法。由于热线法中的热线

很细，热线通电加热后热量向热线的径向方法传播，所以热线法测量的是样品整体导热系数而没有方向性，所以热线法要求被测样品由各向同性材质制成。



图 2-9 美国 TA 公司热线法高温导热仪

### 2.2.5. 瞬态闪光法高温导热系数测试仪器

需要特别指出的是：传统意义上的瞬态闪光法并不适合对耐火隔热材料材料的导热系数进行测试，这主要是因为耐火隔热材料的导热系数普遍偏低，脉冲光辐照到样品前表面后，脉冲形式的加热热量无法传递到样品背面，使得样品背面几乎没有任何温度变化，背温探测器基本检测不到任何温升信号。因此，Gembarovic 和 Taylor 在闪光法基础上开发了一种步进加热三点测温的测试方法用于低导热材料的高温热扩散系数测量<sup>[1]</sup>，测量原理如图 2-10 所示，整个测量装置的结构如图 2-11 所示。

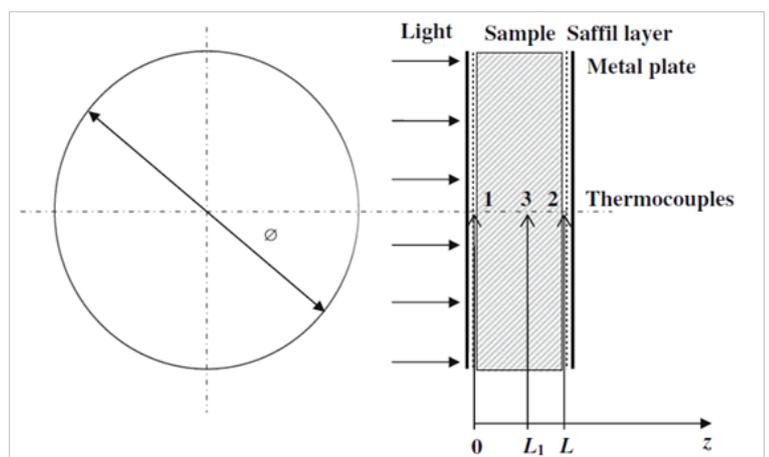


图 2-10 瞬态步进加热三点测温法高温热扩散系数测量原理图

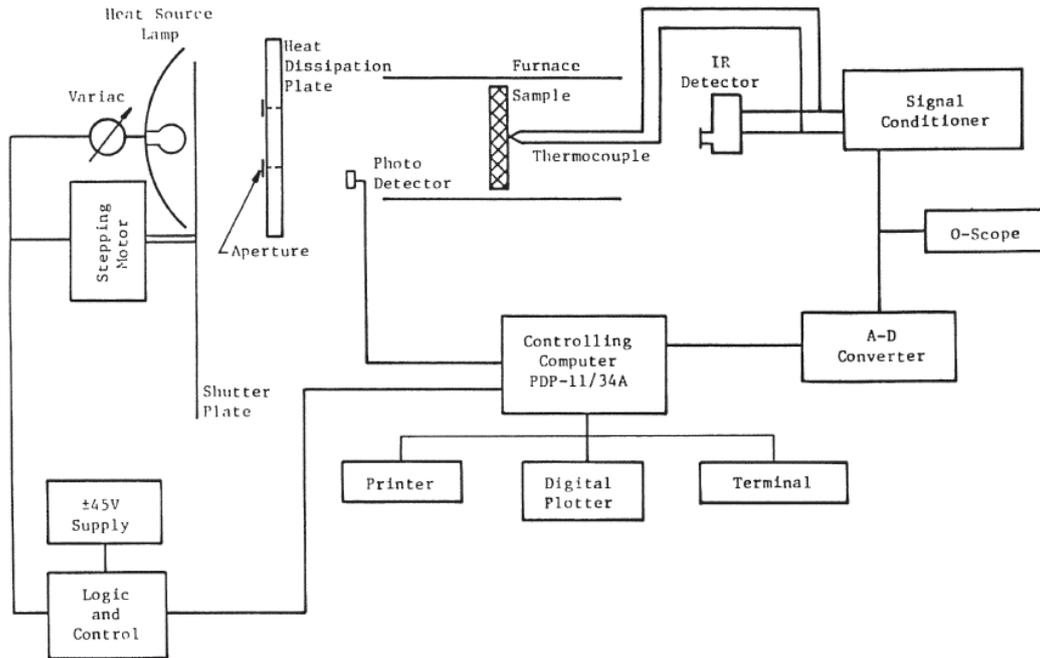


图 2-11 瞬态步进加热三点测温法高温热扩散系数测试系统结构示意图

这种测试方法和设备可以对相对较小的样品（ $\phi 50\text{mm} \times 3 \sim 5\text{mm}$ ）进行温度高达  $1500^\circ\text{C}$  下的高温热扩散系数测量，测量原理与闪光法近似，只是将闪光加热的脉冲宽度加的很长，对样品表面进行长时间的加热，从而使得热量能传递到样品背面获得有效测量信号。但这种测试方法在取样过程中样品不能太厚，否则热量还是无法传递到样品背面，由此很容易造成取样没有代表性问题。

### 2.3. 各种测试方法测试能力比较

通过上述耐火隔热材料导热系数各种测试方法和相应测试设备的描述，将各种测试方法和测试仪器的主要特点、能力和要求进行汇总比较，如图 2-12 所示，由此对各种测试方法有一个直观的了解。

测试方法	热面最高温度	样品特性要求	样品上温度分布	测试速度
稳态热流计法	$1500^\circ\text{C}$	可各向异性	大温差	较快
稳态保护热板法	$600^\circ\text{C}$	可各向异性	小温差	最慢
准稳态法	$1500^\circ\text{C}$	可各向异性	大温差	最快
瞬态热线法	$1500^\circ\text{C}$	各向同性	无温差	较慢
瞬态闪光法	$1800^\circ\text{C}$	可各向异性	无温差	较快

图 2-12 耐火隔热材料导热系数测试方法和测试仪器比较

从图 2-12 中的综合比较可以看出，综合能力排名前两位的是准稳态法和稳态热流计法，这也就是上海依阳实业有限公司选择生产这两种测试仪器的主要原因之一。

### 3. 真导热系数和有效导热系数的定义

根据上述针对耐火隔热材料导热系数测试方法所进行的介绍，可以发现尽管测试方法和测试设备有不同形式，但这些测试方法都离不开温度场这个环境变量和测试条件，即无论测试方法怎么变化，都必须使得被测样品要么是大温差、要么是小温差（将无温差归到小温差范围内）。这样，我们就可以将耐火隔热材料的导热系数按照温差大小分别对应进行定义，即：

- （1）样品小温差下，或无温差下得到的导热系数定义为真导热系数；
- （2）样品大温差下测量得到的导热系数定义为有效导热系数。

以往有效导热系数的定义多根据被测样品的均质性和组分结构的多样性来定义，并没有明确的按照测试温差大小（或使用过程中的温差大小）来定义。现在明确采用温差大小来定义和区分有效导热系数和真导热系数的不同，一方面是便于今后对耐火隔热材料测试方法选择和耐火隔热材料热性能的准确描述，另一方面也是依据标准测试方法所做的规定。

在国内外所有稳态法导热系数标准测试方法中，都指出：“通过测量热流、温差及样品厚度尺寸，利用稳态傅立叶导热公式计算得到的材料传热性质（导热系数或有效导热系数），可能并不是材料自身固有特性，因为它很大程度上可能取决于具体测试条件，例如试验过程中样品上的冷热面温差大小”。这句话指出了两个基本事实，可以理解为有两个含义：

（1）一个事实就是材料的固有特性，即材料的固有特性是不受测试条件影响而本身存在的。所以在测试过程中要明确了解到底测量的是不受测试条件影响的材料固有特性，还是测量与测试或使用环境有关的特定环境特性。

（2）材料的固有特性，很大程度取决于具体测试条件，即取决于样品上的冷热面温差大小。温差小时测量得到则是固有特性，温差大时测量得到的则不是固有特性。

根据标准测试方法中的这些规定，就可以很容易进一步明确耐火隔热材料导热系数的定义：

- （1）样品小温差下，或无温差下得到的导热系数定义为真导热系数，即样品材料的固有导热系数；
- （2）样品大温差下测量得到的导热系数定义为有效导热系数，即样品材料的环境导热系数。

由此可见，一旦材料制成，其真导热系数就会固定不变，真导热系数就是这材料的固有特性。而这种材料在不同使用温度环境下，则会有相应的有效导热系数，这主要是因为在大温差条件下，有效导热系数会包含除真导热系数之外，还包括与辐射和对流传热相对应的辐射导热系数和对流导热系数。

由此可见，在小温差条件下，假设不考虑辐射传热和对流传热形式，同时假设也忽略气体导热传热，那么所谓的真导热系数，基本就代表了材料的固相导热系数。因此，为了对样品材料的真导热系数进行准确测量，很多标准测试方法对导热系数测试中的小温差进行了规定：GJB 329 规定测试温差应控制在

10~50℃，GB/T 10295 建议温差控制在 5~10℃，ASTM 相关标准规定该温差应不大于 25℃。由此可见，在最大温差不超过 50℃条件下，就可以忽略稳态法测量中辐射和对流传热的影响，稳态法测量得到的样品导热系数，就是真导热系数。需要注意的是：耐火隔热材料由于低密度和高孔隙率，材料内部有大量孔隙，由此这个真导热系数，包括了材料的固体导热系数和气体导热系数。

根据上述小温差的定义，温差小于 50℃的导热系数测试都是真导热系数测试。那么对于样品温度均匀无温差的测试，所得到的导热系数更是真导热系数。

完成了两种导热系数定义后，就可以很明确知道不同测试方法测量得到不同类型的导热系数，即：

- (1) 真导热系数测试方法：保护热板法、瞬态热线法、瞬态闪光法。
- (2) 有效导热系数测试方法：热流计法、准稳态法。

## 4. 真导热系数与有效导热系数的关系及其转换

### 4.1. 问题的提出

对于耐火隔热材料的性能测试，国内外都处于非常混乱的局面，有些测试得到的有效导热系数，有些测试得到的则是真导热系数，这些不同导热系数往往会引起隔热材料选择和隔热结构设计的混乱，特别是在耐火隔热材料高温性能测试中，测试方法的混乱使用很容易造成对隔热性能的高估，从而造成隔热效果不佳，甚至出现漏热事故和爆炸。因此，针对耐火隔热材料，如何才能准确测试和描述导热系数才能准确和实用呢，下面将从理论分析方面来对这个问题进行求解。

### 4.2. 真导热系数与有效导热系数的关系

按照上述小温差和大温差形式分别定义真导热系数和有效导热系数，我们选择小温差的保护热板法和大温差的热流计法来研究真导热系数与有效导热系数的关系。

对于大温差的热流计法导热系数测量，有效导热系数  $\lambda_{eff}$  的测量公式为：

$$\lambda_{eff} = \frac{q \cdot L}{(T_H - T_C)} \quad (4.2.1)$$

式中  $q$  表示流经样品厚度方向上的热流密度， $L$  表示样品厚度， $T_H$  表示样品热面温度， $T_C$  表示样品冷面温度。在热流计法大温差测量过程中，样品冷面温度  $T_C$  的变化一般较小，基本都控制在 50℃以下，而热面温度  $T_H$  则较大 (>1000℃)。大温差下得到的有效导热系数  $\lambda_{eff}$  的描述，都需要明确热面温度和冷面温度，并可用平均温度  $(T_H + T_C)/2$  来表达。

对于小温差的保护热板法导热系数测量，真导热系数  $\lambda_{true}$  的测量公式为：

$$\lambda_{true} = \frac{q \cdot d}{\Delta T} \quad (4.2.2)$$

式中  $q$  同样表示流经样品厚度方向上的热流密度,  $d$  表示样品厚度,  $\Delta T$  表示被测样品冷热面之间的温度差。在保护热板法小温差测量过程中, 冷热面温差很小, 基本都控制在  $50^{\circ}\text{C}$  以下。小温差下得到的真导热系数  $\lambda_{true}$  的描述, 由于温差小, 则可以直接用平均温度来描述, 而无需标明热面温度和冷面温度。

尽管大温差和小温差所对应的两种测试方法不同, 但这两种方法都是基于稳态傅立叶传热定律, 公式(4.2.1)和(4.2.2)中各个参量的物理意义是相同的。因此, 大温差的热流计法导热系数测量, 可以在测试模型和数学上假设是由  $n$  多个相同厚度的小温差保护热板法多层叠加而成, 即  $(T_H - T_C) = n \times \Delta T$  和  $L = n \times d$ 。这个假设的前题是:

- (1) 样品材料在测试温度范围内没有化学反应或相变。
- (2) 在小的温度和气压区间内, 真导热系数或保持不变、或呈线性关系。
- (3) 耐火隔热材料中的热传递形式一般由固相介质导热、气相介质导热及辐射传热三部分构成, 如果材料内部不存在通孔形式的孔隙, 可忽略辐射传热对整体热传递的贡献。

这样, 大温差的热流计法导热系数测试模型数学表达式, 就可以用小温差的保护热板法导热系数测试模型数学表达式的积分形式来描述, 由此得出有效导热系数与真导热系数关系式为:

$$\lambda_{eff}(T_H, T_C, P) = \frac{1}{T_H - T_C} \int_{T_C}^{T_H} \lambda_{true}(T, P) dT \quad (4.2.3)$$

式中的  $T$  和  $P$  代表温度和气压变量。通过公式(4.2.3)所定义的真导热系数与有效导热系数的关系, 就可以进行这两种导热系数之间的转换, 即通过大温差的有效导热系数测量推导出相应的小温差时的真导热系数, 或根据小温差真导热系数测量推导出大温差时的有效导热系数。

### 4.3. 由真导热系数推导有效导热系数

由真导热系数测试结果推导出大温差条件下的有效导热系数, 即据根真导热系数测试结果推算出在温度  $T_C \sim T_C$  范围内的大温差有效导热系数, 具体实施方法就是在温度  $T_C \sim T_C$  范围内选择一系列温度点进行保护热板法或瞬态热线法导热系数测试, 得到一系列不同温度下  $T_i$  的真导热系数测试结果  $\lambda_{true}(T_i)$ 。这里的  $T_i$  在保护热板法测试中代表样品的平均温度, 在瞬态热线法和瞬态闪光法中代表样品温度。然后将测试结果  $(T_i, \lambda_{true})$  进行最小二乘法拟合得到一个多项式表达式:

$$\lambda_{true}(T) = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 \quad (4.3.1)$$

式中的  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  是与样品材料自身特性有关的多项式常数。大多数耐火隔热材料的真导热系数与温度的非线性关系一般都可以用一元三次多项式描述。

将得到的真导热系数随温度变化多项式(4.3.1)代入公式(4.2.3) 然后进行积分求解就可以得到相应的

有效导热系数。针对气压变量  $P$  的真导热系数推导有效导热系数也是如此操作。

#### 4.4. 由有效导热系数推导真导热系数

同样，在有效导热系数推导真导热系数过程中，假设真导热系数随温度变化关系是一个三元一次多项式，即：

$$\lambda_{True}(T) = B_0 + B_1T + B_2T^2 + B_3T^3 \quad (4.3.2)$$

式中的  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  是与材料自身特性有关的待定常数。将式(4.3.2)直接代入与式(4.2.3)可得：

$$\lambda_{Eff}(T_H, T_C, P) = \frac{q \cdot L}{T_H - T_C} \quad (4.3.3)$$

$$\lambda_{Eff}(T_H, T_C, P) = B_0 + B_1 \frac{(T_H + T_C)}{2} + B_2 \frac{(T_H^2 + T_H T_C + T_C^2)}{3} + B_3 \frac{(T_H^2 + T_C^2)(T_H + T_C)}{4}$$

在式(4.3.3)中只有  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  四个未知数，理论上可以通过 4 个式(4.3.3)的联立方程就可求解出这四个未知数。即在理论上通过 4 次  $T_H$  值调整，即进行 4 个不同热面温度  $T_H$  下的稳态热流计法导热系数测试试验，同时保持样品冷面温度  $T_C$  基本不变，由此得出 4 组相应的  $\lambda_{Eff}$ 、 $T_H$  值，就可建立这 4 个联立方程，从而求出 4 个待定常数  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  的值，最终得到真导热系数与温度的关系表达式(4.3.2)。

从式(4.3.3)中可以看出，式(4.3.3)对温差大小没有任何限制。因此可以在容易实现的大温差测试条件下进行相应测试和测算。为了提高这种方法的推导计算准确性，在选取  $T_H$  值时应尽可能接近所需要的温度值。例如需求 1000°C 的材料真导热系数，选取的 4 个  $T_H$  值中至少应有一个值为 1000°C 或大于 1000°C。如果需要某一特定温度段的真导热系数，比如需要 500 ~ 1000°C 之间的材料真导热系数，那么 4 个  $T_H$  值建议选取为 500°C、1000°C 以及介于 500°C 与 1000°C 之间的 2 个温度点数据。同时，需要说明的是本方法不是利用低温段真导热系数进行高温真导热系数简单外推，而是在掌握大温差测试条件下有效导热系数相关数据的基础上，通过确定所假设的函数待定常数来最终获取耐火隔热材料高温真导热系数，并且假设的函数形式是统计分析得出的结论以及 ASTM 相关标准认可的。

## 5. 结论

通过以上的理论分析和计算，针对耐火隔热材料导热系数测试中常用的小温差和大温差两类测试方法，明确了有效导热系数和真导热系数的定义，首次详细描述了这两个参数之间的关系、区别和详细转换方法，明确了这两类主流测试方法的适应范围，从而便于在耐火隔热材料性能评价中选择合适的测试方法，有利于对耐火隔热材料的隔热性能做出准确测试评价，从而保证对隔热材料及结构的正确的选择和设计。

下一部工作将针对各种耐火隔热材料的有效导热系数和真导热系数测试数据，对上述的真导热系数

和有效导热系数之间的关系和转换方式进行试验验证，由此来对测试方法、测试设备和两种导热系数相互关系及其转换进行评价。

## 6. 参考资料

(1) Gembarovic, J., and Taylor, R. E., “A Method for Thermal Diffusivity Determination of Thermal Insulators,” *International Journal of Thermophysics*, Vol. 28, No. 6, 2007, pp. 2164–2175.