

## 耐火材料导热系数的几种测试方法

梅鸣华, 李 治, 黄文革

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中冶东方工程技术有限公司, 内蒙古 包头 014010;  
3. 武钢国贸总公司 设备材料部, 湖北 武汉 430080)

**摘 要:** 导热系数是耐火材料重要的热学性能参数, 也是炉窑设计重要的热工技术参数。通过比较国内现行的几种导热系数的测试方法, 可进一步了解不同测试方法的范围和局限, 从而选择合适的测试方法。

**关键词:** 耐火材料; 导热系数; 测试方法

**中图分类号:** TF065.1\*1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6988(2010)05-0035-04

## Several Test Methods of Refractory Thermal Conductivity

MEI Ming-hua, LI Zhi, HUANG Wen-ge

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, Beijing 100088, China;  
2. Beris Engineering and Research Corporation, Baotou 014010, China; 3. Equipment Material Division,  
International Economic & Trading Corp, Wugang Group, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** The thermal conductivity is an important thermal performance parameter of the refractory, is also an important thermal technical parameter of the kiln design. By comparing the thermal conductivities of several domestic current testing methods, the coverage and the limitation of the different test methods are further understood, and the appropriate testing methods are selected.

**Key words:** refractory; thermal conductivity; test methods

物体内部或两个物体之间如果存在温度差, 就要产生热量由高温部分向低温部分转移的现象, 这种热量的转移称为传热。传热过程是一种复杂的物理现象, 按其本质可分为传导、对流和辐射三种基本形式。对于耐火材料来说, 传导是主要的传热方式, 在多孔材料中存在微量的对流传热方式, 但可以忽略不计。

导热系数的测试方式按其基本原理可分为稳态法和非稳态法。按其测量元件, 国内外耐火材料的导热系数测量方法主要有水流量平板法、十字热线法、平行热线法和闪光法。

### 1 水流量平板法

国内的水流量平板法适用于测量热面温度 200~1 300 ℃, 导热系数 0.03~2.00 W/(m·K) 的耐火

材料。美国 ASTM 的水流量平板法适用于测量热面温度 205~1 540 ℃, 导热系数 ≤28.8 W/(m·K) 的耐火材料。

#### 1.1 基本原理

水流量平板法是根据傅立叶一维导热微分方程  $Q = -\lambda dt/dx \cdot F$ , 测量稳态时单位时间内一维温度场中热流纵向通过试样热面传递至冷面, 后被流经中心量热器的水流吸收的热量

$$Q = C \cdot \omega \cdot \Delta t$$

式中:  $Q$ —单位时间内水流吸收的热量, W

$C$ —水的比热, J/(g·K)

$\omega$ —水流量, g/s

$\Delta t$ —水温升高, K

然后, 计算试样的导热系数

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{A \cdot \Delta T}$$

式中:  $\lambda$ —导热系数, W/(m·K)

$Q$ —单位时间内水流吸收的热量, W

收稿日期: 2010-06-09

作者简介: 梅鸣华(1967—), 女, 教授级高工, 主要从事耐火材料的研制、检测及质量管理工作。

$\delta$ —试样厚度, m

$A$ —试样面积,  $\text{mm}^2$

$\Delta T$ —试样冷、热面温度差, K

## 1.2 测试方法

### (1) 国内水流量平板法

将试样制备为  $\Phi(160\sim 180)\text{mm}\times(10\sim 25)\text{mm}$  的一块扁圆柱形, 两端面应平整, 不平行度小于  $\pm 1\text{mm}$ 。试样按规定工艺处理后, 测量厚度, 将  $\Phi 220\text{mm}$  的玻璃纤维布、垫板、冷面热电偶、试样、热面热电偶、均热板同轴地放置在量热器上, 并在试样周围的空隙处填充高铝纤维棉。

### (2) ASTM 水流量平板法

样品由 3 块  $228\text{mm}\times 114\text{mm}\times(51\sim 76)\text{mm}$  的直形砖和 6 块  $228\text{mm}\times 57\text{mm}\times(51\sim 76)\text{mm}$  的条形砖组成, 3 块直形砖中的一块做试样, 另两块作试样两边的护砖, 6 块条形砖放在试样和护砖的周围, 以阻止热量侧向传递。试样和护砖的上下两个端面应研磨平整, 不平行度小于  $\pm 0.3\text{mm}$ , 在试样规定位置钻热电偶孔。将耐火纤维纸、隔热垫板、耐火纤维纸、试样和护砖、均热板同轴地放置在量热器上。

### (3) 导热系数的测量

按规定的升温制度升至实验温度, 达到稳态后, 测量试样冷、热面温度, 中心量热器的水流量, 水温升高, 计算导热系数:

$$\lambda = \frac{k \cdot \Delta mv \cdot \omega \cdot \delta}{l_1 - l_2}$$

式中:  $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$k$ —常数,  $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{mV}\cdot\text{m}^2)$

$\Delta mv$ —中心量热器水温升高电动势差,  $\text{mV}$

$\omega$ —中心量热器的水流量,  $\text{g/s}$

$\delta$ —试样厚度,  $\text{m}$

$t_1$ —试样热面温度,  $^{\circ}\text{C}$

$t_2$ —试样冷面温度,  $^{\circ}\text{C}$

## 1.3 测量精度

### (1) 国内水流量平板法

实验精度误差实验室内为 10%, 实验室间没有确切的统计数据。

### (2) ASTM 水流量平板法

实验精度误差实验室内为 9.4%, 实验室间为 26.6%。

## 2 热线法

十字热线法适用于测量温度  $\leq 1\ 250\ ^{\circ}\text{C}$ , 导热系

数  $\leq 1.5\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的耐火材料。

### 2.1 基本原理

十字热线法属于不稳态导热, 将热线 (通常铂线) 沿试样长度埋设在规定的刻槽内, 通过预埋在其中的热电偶可以测得热线加热后在规定时间内试样温度变化, 从而计算试样的导热系数。

$$\lambda = \frac{V \cdot I}{4\pi} \times \frac{\ln(t_2/t_1)}{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}$$

式中:  $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$V$ —热线单位长度的电压降,  $\text{V/m}$

$I$ —热线电流,  $\text{A}$

$t_2/t_1$ —接通热线回路的测量时间

$\Delta\theta_2, \Delta\theta_1$ —接通热线回路后在  $t_2, t_1$  时间测量时的温升,  $\text{K}$

### 2.2 测试方法

试样由 2~3 块尺寸不小于  $200\text{mm}\times 100\text{mm}\times 50\text{mm}$  的试块组成, 试块的接触面应磨平, 距离  $100\text{mm}$  以内两点间的平整度偏差不得超过  $0.2\text{mm}$ , 按标准规定在试样面上刻槽, 放置在装样台上埋设热线和热电偶, 槽内用磨细的试样细粉填实, 装入炉内升温进行实验。

### 2.3 测量精度

国外资料显示对于热线法, 实验测量误差为 10%~30%, 实验室内测量误差没有确切的统计数据。

## 3 平行热线法

平行热线法适用于测量温度  $\leq 1\ 250\ ^{\circ}\text{C}$ , 导热系数  $\leq 25\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的耐火材料。

### 3.1 基本原理

与十字热线法相同, 都属于不稳态导热法, 将热线沿试样长度埋设在规定的刻槽内, 加热热线后, 通过测量埋设在试样规定位置的热电偶温升, 计算试样的导热系数。

$$\lambda = \frac{V \cdot I}{4\pi \cdot L} \times \frac{-Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right)}{\Delta\theta(t)}$$

式中:  $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$V$ —热线电压,  $\text{V}$

$I$ —热线电流,  $\text{A}$

$L$ —埋设在试样刻槽内规定位置间的热线长度,  $\text{m}$

$\Delta\theta(t)$ —在  $t$  时间测量热电偶和示差热电偶之间的温差, K

$t$ —接通热线回路间的时间, s

$r$ —热线和测量热电偶的间距, m

$\alpha$ —热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$-Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) - \int_x^u \frac{-e^{-u}}{u} du$  的指数积分, 依据

$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  确定。

### 3.2 测试方法

试样由 2 块尺寸不小于  $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  的试块组成, 试块的接触面应磨平, 距离  $100\text{ mm}$  以内两点间的平整度偏差不超过  $0.2\text{ mm}$ , 按标准规定在下试块的砖面上刻槽, 放置在装样台上埋设热线和热电偶, 槽内用磨细的试样细粉填实, 装入炉内升温进行实验。

### 3.3 测量精度

国外资料显示对于热线法, 实验测量误差为  $10\%\sim 30\%$ , 实验室内测量误差没有确切的统计数据。

## 4 闪光法

闪光法适用于测量  $-200\sim 2\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ , 导热系数  $0.05\sim 2\ 000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的耐火材料。

### 4.1 基本原理

闪光法属于不稳态导热法, 受高强度短时能量脉冲辐射, 试样正面吸收能量使背面温度升高, 根据试样厚度和背面温度达到最大值的某一百分率所需时间测出试样的热扩散系数, 从而计算试样的导热系数。

### 4.2 测试方法

#### (1) 试样制备

典型的试样为 2~6 个直径  $6\sim 18\text{ mm}$ , 厚度  $1\sim 6\text{ mm}$  (最佳厚度取决于所估计的热扩散系数数值, 确保达到最高温度所需的时间在  $40\sim 200\text{ ms}$  之内变化) 的薄片, 试样表面必须平整且相互平行。

#### (2) 试样测试

试样装入支架中, 设备处于正常状态, 可以进行常温、高温实验。

#### 1) 热扩散系数的测定

热扩散系数由起始脉冲开始到试样背面温度升至最高所需的一半时间  $t_{1/2}$  确定。

$$\alpha = 0.138\ 79\ L^2/t_{1/2}$$

式中:  $\alpha$ —热扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$t_{1/2}$ —试样背面温升达到最大温升值一半所需的时间, s

$L$ —试样厚度, mm

#### 2) 比热的测定

选用一个与待测试样相近的已知比热的试样作为参考, 在相同的处理条件下进行相同的闪光加热, 测出各自的最大温升, 计算得出待测试样的比热。

$$C_{px} = \frac{C_{ps} \cdot m_s \cdot \Delta T_s}{m_x \cdot \Delta T_x}$$

式中:  $C_{px}$ —待测试样比热,  $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$

$C_{ps}$ —标准试样比热,  $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$

$m_x$ —待测试样质量, g

$m_s$ —标准试样质量, g

$\Delta T_x$ —待测试样背面的最大温升, K

$\Delta T_s$ —标准试样背面的最大温升, K

#### 3) 导热系数的测定

导热系数可以通过试样的热扩散系数和比热计算得到。

$$\lambda = k \cdot \alpha \cdot \rho \cdot C_p$$

式中:  $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$k$ —常数

$\alpha$ —热扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$\rho$ —体积密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$C_p$ —比热,  $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$

### 4.3 测量精度

闪光法测量导热系数, 国外资料显示对于均相质的材料, 实验测量误差为  $5\%$ , 而对于非均相质的材料, 没有确切的实验测量误差的统计数据。但在国内耐火材料行业并不普遍, 对其实验测量误差需采用数据采集和数据分析的方法才能获得。

## 5 几种测试方法的比较

对于耐火材料来说, 应依据其导热系数的数值选用合适的测量方法, 方法不同, 测量的数值也不尽相同, 见表 1。

## 6 结论

由上表分析得出: 对于不同的耐火材料应选择相应的导热系数测量方法, 轻质耐火材料宜优先选

表1 不同测量条件下各种耐火材料的导热系数

试样名称	测量温度 / °C	导热系数 W/(m·K)			闪光法
		水流量 平板法	十字 热线法	平行 热线法	
轻质砖 1	25		0.214	0.30	
轻质砖 1	750		0.423	0.39	
轻质砖 2	1 000		0.502	0.50	
轻质砖 3	200	0.122		0.26	
轻质砖 3	400	0.151		0.30	
轻质砖 3	600	0.192		0.35	
轻质砖 4	200	0.136		0.28	
轻质砖 4	400	0.153		0.33	
轻质砖 4	600	0.184		0.37	
轻质浇注料	1 000		0.585	0.75	
轻质硅砖 1	350	0.301	0.658		
轻质硅砖 2	350	0.241	0.598		
SiC 捣打料	350			3.61	6.12
SiC 浇注料	20			6.54	22.70
SiC 浇注料	200			6.47	21.67
炭素捣打料 1	100			7.56	22.03
炭素捣打料 1	200			6.88	21.25
炭素捣打料 1	300			6.88	20.64
炭素捣打料 2	600			3.66	10.50

用水流量平板法测量,其次是十字热线法和平行热线法;非含碳和非导电重质耐火材料可依据导热系数大小选用平行热线法和十字热线法测量,含碳和导电耐火材料宜选用闪光法测量。

参考文献:

- [1] 葛霖.筑炉手册[M].北京:冶金工业出版社,1994.
- [2] 全国耐火材料标准化委员会.GB/T 5990-2006 耐火材料导热系数试验方法(热线法)[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [3] 全国耐火材料标准化委员会.YB/T 4130-2005 耐火材料导热系数试验方法(水流量平板法)[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [4] 美国试验与材料协会.ASTM C 201-2004 耐火材料导热系数试验方法[S].
- [5] 美国试验与材料协会.ASTM E1461-2001 闪光法测定热扩散系数的标准试验方法[S].

(上接第 34 页)

表1 天然气管路计算条件

分段号	0—1	1—2	2—3
分段名称	接点到总管末端	总管末端到一级支管末端	烧嘴前支管
长度/m	38.325	16.09	0.912 5
绝对粗糙度/m	0.3	0.25	0.25
局部阻力系数之和	6.33	12.8	1.6
上升高度/m	20.226	0	0.628

表2 管径计算相关结果

分段号	计算管径/m	圆整后管径/m	管道外径/m	壁厚/m	管道内径/m	管道类型
0—1	0.224	0.2	0.219	0.006	0.207	无缝钢管
1—2	0.075	0.065	0.076 1	0.004	0.068	低压流体输送用焊接钢管
2—3	0.022	0.02	0.026 9	0.002 8	0.021	低压流体输送用焊接钢管

5 结语

在传统的退火炉流体管路水力计算中,需要频繁查表,并且手工计算很繁琐,利用 Excel 电子表格,提高了计算效率和质量,只需要计算者在输入数据区域输入所需要的参数,即可自动进行管路水力

表3 系统总压力损失表

分段号	0—1	1—2	2—3
速度头/Pa	54.81	57.77	41.92
速度头的变化/Pa		2.96	-15.85
几何压头损失/Pa	-150.38	0	-4.67
局部阻力损失/Pa	294.62	627.87	56.95
摩擦阻力损失/Pa	196.35	342.96	65.94
各管段压力损失/Pa	340.59	973.79	102.37
非标设备压力损失/Pa		6 883	
系统总压力损失/Pa		8 299.75	

计算。

参考文献:

- [1] 机械设计手册编委会.机械设计手册单行本管道与管道附件[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 陈卓如,金朝铭.工程流体力学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [3] 钢铁企业燃气设计参考资料编写组.钢铁企业燃气设计参考资料(煤气部分)[M].北京:冶金工业出版社,1978.
- [4] 邓立强.应用 Excel 编制供暖空调管路水力计算表[J].暖通空调,2007,37 (9):120-122.
- [5] 动力管道设计手册编写组.动力管道设计手册[M].北京:机械工业出版社,2006.

## 耐火材料导热系数的几种测试方法

作者: [梅鸣华](#), [李治](#), [黄文革](#), [MEI Ming-hua](#), [LI Zhi](#), [HUANG Wen-ge](#)  
作者单位: [梅鸣华, MEI Ming-hua \(中冶建筑研究总院有限公司, 北京, 100088\)](#), [李治, LI Zhi \(中冶东方工程技术有限公司, 内蒙古, 包头, 014010\)](#), [黄文革, HUANG Wen-ge \(武钢国贸总公司, 设备材料部, 湖北, 武汉, 430080\)](#)  
刊名: [工业炉](#) [ISTIC](#)  
英文刊名: [INDUSTRIAL FURNACE](#)  
年, 卷(期): 2010, 32 (5)

### 参考文献(5条)

1. [葛霖](#) [筑炉手册](#) 1994
2. [全国耐火材料标准化委员会](#) [GB/T 5990-2006耐火材料导热系数试验方法\(热线法\)](#) 2007
3. [全国耐火材料标准化委员会](#) [YB/T 4130-2005耐火材料导热系数试验方法\(水流量平板法\)](#) 2005
4. [美国试验与材料协会](#) [ASTM C 201-2004耐火材料导热系数试验方法](#)
5. [美国试验与材料协会](#) [ASTM E1461-2001闪光法测定热扩散系数的标准试验方法](#)

### 本文读者也读过(5条)

1. [刘东国](#). [LIU Dong-guo](#) [耐火纤维模块的选用、施工及维护](#) [期刊论文]-[工业炉](#)2010, 32 (6)
2. [霍大勇](#). [HUO Da-yong](#) [工业用热电偶运行维护口诀80句](#) [期刊论文]-[工业炉](#)2010, 32 (5)
3. [王小萍](#). [黄绪泉](#). [成立](#) [耐火材料导热系数的特性与影响因素综述](#) [期刊论文]-[科技信息\(学术版\)](#)2008 (24)
4. [杜慧卿](#). [张军](#). [DU Hui-qing](#). [ZHANG Jun](#) [步进梁式钢管热处理炉温度控制的研究和应用](#) [期刊论文]-[工业炉](#)2010, 32 (5)
5. [田晶晶](#). [张秀华](#). [田志宏](#). [梅鸣华](#). [李丹](#). [Tian Jingjing](#). [Zhang Xiuhua](#). [Tian Zhihong](#). [Mei Minghua](#). [Li Dan](#) [耐火材料导热系数的影响因素](#) [期刊论文]-[工程与试验](#)2010, 50 (3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gyl201005011.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gyl201005011.aspx)