

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.017



温度和含湿量对建筑材料导热系数的影响

孙立新^{1,2}, 冯驰^{2,3}, 崔雨萌³

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院 建筑环境与节能研究院, 北京 100013;
3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

摘要: 导热系数是建筑材料最重要的热湿物性参数之一, 温度和含湿量均能够对其产生影响。当温度和含湿量中的一个因素被确定后, 一元线性函数通常被用来描述另一个因素对导热系数的影响。然而, 实际情况下二者对导热系数的影响是同时存在的。采用防护热板法对聚苯乙烯泡沫 (EPS)、岩棉、混凝土、胶粘剂和抹面胶等 5 种典型建筑材料在不同温度和含湿量下的导热系数进行测试。结果表明, 对上述材料而言, 二元线性函数可以用来描述温度和含湿量对导热系数的影响, 且温度和含湿量之间的交互作用可以被忽略。对于 EPS 和岩棉等弱吸湿弱毛细材料而言, 可以将二元线性函数简化为仅与温度相关的一元线性函数。

关键词: 导热系数; 温度; 含湿量; 建筑材料

中图分类号: TU111.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0123-06

Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of building materials

Sun Lixin^{1,2}, Feng Chi^{2,3}, Cui Yumeng³

(1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;
2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641 P. R. China)

Abstract: Thermal conductivity is one of the most important hygrothermal properties of building materials which depends on temperature and moisture content. The one-variable linear function is usually used to describe the influence of either temperature or moisture content on the thermal conductivity when the other one is fixed. However, for real situations temperature and moisture content have simultaneous influence. The thermal conductivities of five typical building materials-expanded polystyrene (EPS), mineral wool, concrete, adhesive mortar and rendering plaster-were measured with the guarded-hot-plate apparatus at different temperature and moisture content. Results show that the two-variable linear function is sufficient to describe the coupled influence of temperature and moisture content on all studied materials. The interaction between temperature and moisture content is negligible. For weakly hygroscopic and capillary materials such as EPS and mineral wool, the two-variable linear function can be simplified to the one-

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51508542); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题 (2016ZB19)

作者简介: 孙立新 (1983-), 男, 博士, 主要从事建筑热湿环境与节能研究, (E-mail) cabrsunlx@163.com.

Received: 2017-03-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508542); Foundation of State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology (No. 2016ZB19)

Author brief: Lixin Sun (1983-), PhD, main research interests: hygrothermal environment and energy efficiency of buildings, (E-mail) cabrsunlx@163.com.

variable linear function of temperature.

Keywords: thermal conductivity; temperature; moisture content; building material

导热系数 λ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 是建筑材料最重要的热湿物性参数之一,与建筑能耗、室内环境及很多其他热湿过程息息相关^[1-6]。研究人员对不同建筑材料的导热系数进行了大量的测试,积累了丰富的数据:比利时、荷兰、法国、德国、意大利和英国共同完成的 IEA Annex 14 项目测试了 31 种常用建筑材料的导热系数^[7];由 14 个欧美国家共同完成的 IEA Annex 24 项目总结了 32 种常用建筑材料的导热系数^[8];ASHRAE 1018RP 项目给出了 37 种北美常用建筑材料的导热系数^[9]。Clarke 等全面分析了建筑材料的既有热物性数据库,对其加以归纳和整理^[10]。《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)对中国常用建筑材料的导热系数加以规定,并在生产实践中广泛应用^[11]。

建筑材料的导热系数与很多因素有关,其中,温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 和含湿量 u (kg/kg) 的影响较为明显。很多数学模型可以描述它们的影响,其中,线性方程的使用最为广泛,如式(1)和式(2)。

$$\lambda(t) = \lambda(t_{\text{ref}}) + a \cdot (t - t_{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$\lambda(u) = \lambda(u_{\text{ref}}) + b \cdot (u - u_{\text{ref}}) \quad (2)$$

式中: t_{ref} ($^{\circ}\text{C}$) 和 u_{ref} (kg/kg) 为基准温度和基准含湿量; a 和 b 分别代表温度和含湿量影响的斜率。

这两个简单的线性方程能够组合得到描述导热系数的 4 种表达方式:

1) 将导热系数表达为温度和含湿量的二元线性函数 ($a \neq 0, b \neq 0$)^[12]; 2) 将导热系数表达为温度的一元线性函数 ($a \neq 0, b = 0$)^[13]; 3) 将导热系数表达为含湿量的一元线性函数 ($a = 0, b \neq 0$)^[14]; 4) 将导热系数取为常数 ($a = 0, b = 0$)^[11]。

最后一种方法的精度在粗略的计算中可以被接受。但为了更精确的分析,则需要考虑温度和含湿量的影响。本文对前 3 种方法进行比较,研究温度和含湿量对建筑材料导热系数的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用 5 种典型的建筑材料进行导热系数的测试:聚苯乙烯泡沫(EPS)、岩棉、混凝土、胶粘剂和抹面胶。表 1 概括了测试材料的重要基本性质,包括:表观密度 ρ (kg/m^3)、孔隙率 ϕ 、干杯水蒸气渗透阻力因子 μ 、84.3% 相对湿度下的吸湿平衡含湿量 $u_{84.3\%}$

(kg/kg)、吸水系数 A_w ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$) 和毛细含湿量 w_{cap} (kg/m^3)。从表 1 可知,EPS 和岩棉是弱吸湿和弱毛细的,混凝土和胶粘剂是强吸湿强毛细的,而抹面胶是强吸湿弱毛细的。

表 1 测试材料的基本性质

Table 1 Basic properties of experimental materials

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\phi/\%$	$\mu/$ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1},$ $\%^{-1}$)	$u_{84.3\%}/$ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1},$ $\%^{-1}$)	$A_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5})$	$w_{\text{cap}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
EPS	18.6		41	0.62		
岩棉	149		3	0.31		
混凝土	2 182	17.5	61	1.24	0.027	157.6
胶粘剂	1 377	35.0	12	1.47	0.020	205.2
抹面胶	1 426	44.3	18	1.58		

1.2 实验装置

导热系数的测试分为动态法和稳态法,稳态法又分为热流计法和防护热板法。考虑到仪器精度以及控温范围,参照 GB/T 10294—2008 标准,采用防护热板法进行测试^[15]。

实验仪器如图 1 所示,包括主体、冷热源控制系统和智能测量仪 3 部分。主体由热板、冷板和试件夹紧系统组成。热板包括主加热板、护加热板以及背护加热板 3 个主要部分。主加热板和护加热板由电阻加热器及智能测量仪控温,背护加热板由精密恒温水槽控温,使 3 块加热板的温度保持一致 ($t_{\text{hot}}, ^{\circ}\text{C}$)。冷板由铝板、半导体制冷体和冷却水套组成,可精确控制冷板温度在设定值 ($t_{\text{cold}}, ^{\circ}\text{C}$)。智能测量仪用于整个测试系统的温度测量及控制,以实现全自动的测试。

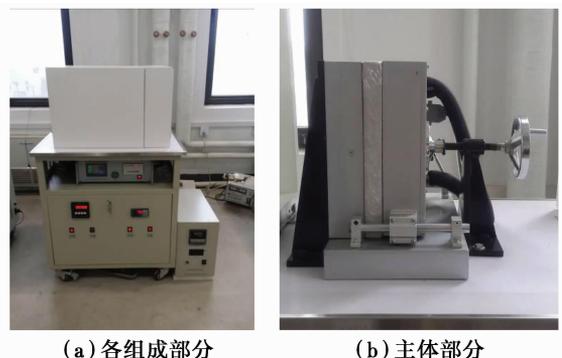


图 1 防护热板导热仪

Fig. 1 Guarded hot plate apparatus

测试时,通过智能测量仪的自动调节,实现热板、冷板的恒温和加热功率的稳定,最终达到一维稳态传热状态。实际通过试件的热流密度 q (W/m^2) 根据主加热板的耗电功率及尺寸得到。对厚度为 D (m)、由均质材料制成的试件而言,其导热系数可通过下式计算得到

$$\lambda = \frac{q \cdot D}{t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}} \quad (3)$$

1.3 实验方法

每种材料各制备 3~6 个尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 3 \sim 5 \text{ cm}$ 的试件,在不同温度和含湿量下对导热系数进行 12~35 次测试。测试前先将试件培养至不同的含湿量,然后将试件的各面用 4 层塑料薄膜包裹起来。薄膜的水蒸气渗透阻 $S_d > 1.5 \text{ m}$, 可视为不透气。其厚度和热阻分别为 0.0225 mm 和 $0.000537 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, 均可以忽略。表 2 为测试工况基本信息。测试的系统性误差(如接触热阻等)已经被修正^[16]。

表 2 测试工况基本信息

Table 2 General information of measurements

材料	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$		最低温度/ $^{\circ}\text{C}$		最高含湿量/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\%^{-1}$)
	热板	冷板	热板	冷板	
EPS	45	25	1	-21	3.8
岩棉	44	25	1	-22	0.3
混凝土	45	27	1	-18	7.7
胶粘剂	45	25	1	-19	16.7
抹面胶	44	29	1	-21	6.0

2 实验结果

2.1 一元线性拟合

首先对导热系数随温度和含湿量的变化分别进行线性拟合。选取 $t_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $u_0 = 0 \text{ kg}/\text{kg}$ 作为基

准温度和基准含湿量,因此,式(1)和式(2)可以被简化为

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + a \cdot t \quad (4)$$

$$\lambda(u) = \lambda(u_0) + b \cdot u \quad (5)$$

用式(4)和式(5)对各种材料的测试结果分别进行拟合,结果见表 3。

表 3 一元线性拟合结果

Table 3 Results of one-variable linear fittings

材料	$\lambda(t) = \lambda(t_0) + a \cdot t$			$\lambda(u) = \lambda(u_0) + b \cdot u$		
	$\lambda(t_0)$	a	R^2	$\lambda(u_0)$	b	R^2
EPS	0.034 2	3.61×10^{-4}	0.88	0.039 0	0.060 2	0.01
岩棉	0.035 1	3.95×10^{-4}	0.98	0.040 3	0.722 5	0.01
混凝土	0.453 3	0.003 28	0.51	0.443 8	2.299 6	0.53
胶粘剂	0.278 3	0.001 9	0.15	0.242 6	1.329 0	0.86
抹面胶	0.550 9	0.003 48	0.37	0.481 0	4.185 9	0.49

由表 3 可知, EPS 和岩棉的导热系数可以较好的表达为温度的一元线性函数。这是因为这两种材料是弱吸湿弱毛细的,其含湿量很低,因此水分对导热系数的影响基本可以忽略不计。但其他材料一元线性拟合的结果并不理想,说明需要同时考虑温度和含湿量的影响。

2.2 二元拟合

为同时考虑温度和含湿量对导热系数的影响,可将式(4)和式(5)简单叠加,得到式(6)

$$\lambda(t, u) = \lambda(t_0, u_0) + a \cdot t + b \cdot u \quad (6)$$

然而,对式(4)进行关于含湿量的积分,或者对式(5)进行关于温度的积分,还会出现二次项,即

$$\lambda(t, u) = \lambda(t_0, u_0) + a \cdot t + b \cdot u + c \cdot t \cdot u \quad (7)$$

式(7)中, c 也为拟合常数。显然, $c \cdot t \cdot u$ 表征了温度和含湿量的交互作用。用式(6)和式(7)对各种材料的测试结果分别进行拟合,结果见表 4。

表 4 二元拟合结果

Table 4 Results of two-variable fittings

材料	$\lambda(t, u) = \lambda(t_0, u_0) + a \cdot t + b \cdot u$				$\lambda(t, u) = \lambda(t_0, u_0) + a \cdot t + b \cdot u + c \cdot t \cdot u$				
	$\lambda(t_0, u_0)$	a	b	R^2	$\lambda(t_0, u_0)$	a	b	c	R^2
EPS	0.033 8	3.51×10^{-4}	0.023 9	0.89	0.032 6	3.99×10^{-4}	0.086 7	-0.002 25	0.90
岩棉	0.036 2	4.09×10^{-4}	-1.245 5	0.98	0.036 0	4.22×10^{-4}	-0.433 0	-0.048 6	0.99
混凝土	0.408 4	0.002 8	1.979 2	0.89	0.416 4	0.0022	1.609 2	0.022 6	0.91
胶粘剂	0.223 7	0.001 3	1.277 1	0.92	0.230 9	8.57×10^{-4}	1.082 3	0.001 0	0.93
抹面胶	0.428 6	0.003 5	4.164 8	0.86	0.440 5	0.002 7	3.772 3	0.023 3	0.86

表 4 中的结果提供了大量的有意义的信息。首先,式(6)和式(7)都可以较好的拟合出所有材料的导热系数,证明了同时考虑温度和含湿量影响的必要性。此外,对几乎所有材料而言,式(7)的 R^2 比式(6)的都大,表明式(7)的拟合精度更高;但这种提高有限(不超过 0.02),即在数学上说明增加 $c \cdot t \cdot u$ 项并未能大幅度提高拟合精度,在物理上说明温度和含湿量的交互作用并没有对导热系数产生很大的影响。简便起见,可以直接使用式(6)。最后,对 EPS 和岩棉等弱吸湿弱毛细材料而言,式(6)的拟合精度并没有明显高于式(4)的拟合精度,再次说明这类材料的导热系数仅与温度有明显关系,可以忽略含湿量的影响,而直接使用式(4)进行描述。

3 讨论

3.1 拟合的合理性

在进行上述拟合时,采用冷热板的平均温度和材料平均含湿量进行计算。在实际测试过程中,当达到最终稳态时,材料内部的温度和含湿量分布都不是均匀的,因此需要对这种简化的有效性进行验证。

首先考虑厚度为 D ,平均含湿量为 u ,两表面温度为 t_a 和 t_b 的单层材料,如图 2 所示。

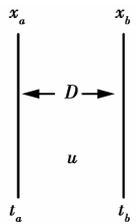


图 2 单层材料工况

Fig. 2 Single-layer material case

根据傅里叶公式,有

$$\int_{x_a}^{x_b} q dx = \int_{t_a}^{t_b} \lambda dt \tag{8}$$

将式(6)代入式(8)并变形,可得

$$q = - \left[\lambda(t_0, u_0) + a \cdot \frac{t_a + t_b}{2} + b \cdot u \right] \cdot \frac{t_b - t_a}{D} \tag{9}$$

可见在线性关系的前提下,通过平均温度和平均含湿量对材料的平均导热系数进行计算是可行的。

事实上,材料内部的含湿量分布是不均匀的。为此进一步将平均含湿量为 u 的整体材料划分为等厚度($d_i = D/n$)的 n 层。其中的每一层内仍假设含

湿量(u_i)是均匀分布的,但每一层的含湿量都不同。此外,同时,假设材料内的温度呈线性变化,即 $t_{i,i+1} - t_{i-1,i} = (t_n - t_1)/n$ 。图 3 描述了上述情况。

层数	1	2	...	i	...	$n-1$	n	
导热系数	λ_1	λ_2	...	λ_i	...	λ_{n-1}	λ_n	
含湿量	u_1	u_2	...	u_i	...	u_{n-1}	u_n	
厚度	d	d	...	d	...	d	d	
温度	t_1	$t_{1,2}$...	$t_{i-1,i}$	$t_{i,i+1}$...	$t_{n-1,n}$	t_n

图 3 多层材料工况

Fig. 3 Multi-layer material case

稳态下,各层的热流密度相等

$$q = q_i = \lambda_i \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{d} = \left(\lambda_0 + a \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{2} + b \cdot u_i \right) \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{d} \tag{10}$$

将各层叠加后取平均值,可得

$$q = \frac{1}{n \cdot d} \sum_{i=1}^n \left[\left(\lambda_0 + a \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{2} + b \cdot u_i \right) \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i}) \right] \tag{11}$$

或改写为

$$D \cdot q = \sum_{i=1}^n [\lambda_0 \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] + \sum_{i=1}^n \left[a \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{2} \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i}) \right] + \sum_{i=1}^n [b \cdot u_i \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] \tag{12}$$

式(12)的等号右侧共有 3 项

$$\sum_{i=1}^n [\lambda_0 \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] = \lambda_0 \cdot \sum_{i=1}^n [\lambda_0 \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] = \lambda_0 (t_n - t_1) \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^n \left[a \cdot \frac{t_{i,i+1} - t_{i-1,i}}{2} \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i}) \right] = \frac{a}{2} \sum_{i=1}^n [(t_{i,i+1} + t_{i-1,i}) \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] = \frac{a}{b} \sum_{i=1}^n (t_{i,i+1}^2 - t_{i-1,i}^2) = a \cdot \frac{t_n + t_1}{2} \cdot (t_n - t_1) \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^n [b \cdot u_i \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] =$$

$$b \cdot \sum_{i=1}^n [u_i \cdot (t_{i,i+1} - t_{i-1,i})] =$$

$$b \cdot (t_n - t_1) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} = b \cdot (t_n - t_1) \cdot u \quad (15)$$

将式(13)~式(15)代入式(12),最终可得

$$q = \frac{t_n - t_1}{D} \cdot \left(\lambda_0 + a \cdot \frac{t_n + t_1}{2} + b \cdot u \right) \quad (16)$$

由此可见,使用平均温度和平均含湿量进行计算是合理的。值得注意的是,上述推导过程假定了材料中的温度呈线性分布,这虽然不完全准确,但在大多数情况下是基本合理的近似。

3.2 结果的合理性

实验结果表明,随着温度的升高或含湿量的增大,所测5种典型建筑材料的导热系数都呈增大的趋势。下面从微观机理上对此加以分析。

对多孔材料而言,当其受潮后,液态水会替代微孔中原有的空气;而在常温常压下,液态水的导热系数(约为0.59 W/(m·K))远大于空气的导热系数(约为0.026 W/(m·K)),因此,含湿材料的导热系数会大于干燥材料的导热系数,且含湿量越高,导热系数也越大。若在低温下水分凝结成冰,由于冰的导热系数高达2.2 W/(m·K),因此材料整体的导热系数也将增大。

与受潮带来的影响不同,温度升高会引起分子热运动的加快,促进固体骨架的导热及孔隙内流体的对流传热。此外,孔壁之间的辐射换热也会因为温度的升高而加强。若材料含湿,则温度梯度还可能造成重要影响:温度梯度将形成蒸汽压梯度,使水蒸气从高温侧向低温侧迁移;在特定条件下,水蒸气可能在低温侧发生冷凝,形成的液态水又将在毛细压力的驱动下从低温侧向高温侧迁移。如此循环往复,类似于热管的强化换热作用,使材料表现出来的导热系数明显增大。

4 结论

研究了温度和含湿量对建筑材料导热系数的影响。通过防护热板法对不同温度和含湿量下聚苯乙烯泡沫(EPS)、岩棉、混凝土、胶粘剂和抹面胶的导热系数进行了测试。结果表明,温度和含湿量对上述材料导热系数的影响为线性,且温度和含湿量的交互作用并不明显,因此可以采用二元线性方程将导热系数表达为温度和含湿量的函数。对于EPS

和岩棉等弱吸湿弱毛细材料,可以忽略含湿量的影响,将导热系数表达为温度的一元线性函数。

参考文献:

- [1] SCHIAVONI S, DALESSANDRO F, BIANCHI F, et al. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 988-1011.
- [2] AMIN M, PUTRA N, KOSASIH E A, et al. Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 273-280.
- [3] KHOUKHI M, FEZZIOUI N, DRAOUI B, et al. The impact of changes in thermal conductivity of polystyrene insulation material under different operating temperatures on the heat transfer through the building envelope [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 669-674.
- [4] ZHANG J, XU W, LI A, et al. Study on improving thermal environment and energy conservation of quadrangle adobe dwelling [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 129: 92-101.
- [5] LIU L, SU D, TANG Y, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 305-317.
- [6] LI J, LI X, WANG N, et al. Experimental research on indoor thermal environment of new rural residence with active solar water heating system and external wall insulation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 35-41.
- [7] HENS H. IEA Annex 14: Condensation and energy, Volume 3: Catalogue of material properties [R]. 1991.
- [8] KUMARAN M K. IEA Annex 24: Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts. Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties [R]. 1996.
- [9] KUMARAN M K. A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials, final report from ASHRAE research project 1018-RP [R]. 2002.
- [10] CLARKE J, YANESKE P, PINNEY A. BEPAC research report: The harmonization of thermal properties of building materials [R]. 1990.
- [11] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016 [S]. 2016. Thermal design code for civil buildings: GB 50176-2016 [S]. 2016. (in Chinese)
- [12] ZHANG X, KÜNZEL H M, ZILLIG W, et al. A

- Fickian model for temperature-dependent sorption hysteresis in hygrothermal modeling of wood materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 58-64.
- [13] KUMARAN M K, LACKEY J, NORMANDIN N, et al. Summary report from task 3 of MEWS project at the Institute for Research in Construction-Hygrothermal properties of several building materials [R]. 2002.
- [14] GAWIN D J, KOSNY J, WILKES K. Thermal conductivity of moist cellular concrete - Experimental and numerical study [C]//Buildings IX-Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings, Clearwater Beach, Florida, ASHRAE, 2004:1-10.
- [15] 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法: GB/T 10294-2008 [S]. 2008.
- Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus : GB/T 10294-2008 [S]. 2008. (in Chinese)
- [16] 于水, 崔雨萌, 冯驰, 等. 稳态法测试保温材料导热系数的系统性误差 [J]. *建筑科学*, 2016, 32(10): 50-54.
- YU S, CUI Y M, FENG C, et al. Systematic errors in steady-state measurements on the thermal conductivities of insulation materials [J]. *Building Science*, 2016, 32(10): 50-54. (in Chinese)

(编辑 胡玲)