

# 建筑围护结构传热性能现场检测的误差分析

邹定华

(河南理工大学材料科学与工程学院,河南焦作454000)

**摘要:**建筑外墙传热性能现场检测是建筑节能检验的重点与难点,目前的检测方法难以得出较为准确的结果。针对以上问题,提出了采用热箱加热流计的检测方法以及该方法的误差评价方法,并运用计算机模拟的手段分析了热箱尺寸、温度制度、墙体构造、墙体厚度对该方法检测结果误差的影响,指出影响误差的主要因素是热箱尺寸和墙体厚度。根据模拟试验结果进行了现场检测试验,证明热箱加热流计的检测结果有良好的精度。

**关键词:**节能;墙体;现场检测;误差分析

**中图分类号:**TU111.2   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-4764(2011)06-0124-05

## Error Analysis for In-situ Measurement of Heat-transfer Coefficient of Building Envelope

ZOU Ding-hua

(School of Material Science and Engineering, Henan polytechnic University, Jiaozhuo 454000 Henan, P. R. China)

**Abstract:** The in-situ measurement of heat-transfer coefficient of external wall is the major content of building energy efficient measurement. A new test method and error assessment function were put forward. Computer simulation was conducted to analysis the influence of hot-box size, air temperature in hot box, structure and thickness of external wall on the result error to provide the theoretical guidance for test apparatus development. The results show that, size of hot-box and thickness of external wall is the major factors which decide the error in test. In-situ measurements were conducted according to the computer simulation results and show fine accuracy.

**Key words:** energy conservation; walls; in-situ measurement; error analysis

建筑节能的检验项目随着建筑所处的热工分区不同而不同,一般包括建筑围护结构主体部位的传热系数、建筑围护结构的热工缺陷、热桥部位温度、窗户气密性、冬季室内平均温度、采暖空调系统的检验、建筑年能耗等<sup>[1-4]</sup>。在这些项目中,最为重要也最难以检测的是外墙的传热系数<sup>[5]</sup>。

目前常用的建筑外墙传热系数现场检测方法有2种<sup>[6-12]</sup>,一种是热流计法,一种是热箱法。热流计法的应用时间较长,已形成相关的技术标准<sup>[13-15]</sup>。但是根据实际应用的情况来看,热流计法可应用的地区和时间都受到限制,在室内外温差较大,室外天气较为温和的情况下其所测得的结果较为准确,即

只适合在北方地区的冬天进行测量,在其它时间和其它地区其所测得的结果标准偏差高达20%以上<sup>[2]</sup>,结果的可信度低,不能作为工程检验的依据。究其原因,热流计法以稳态传热的原理作为其检验依据,而在实际情况中,由于天气变化的影响,建筑外墙很难达到稳态传热<sup>[16]</sup>,所获得的数据并不符合稳态传热的规律。此外,在非采暖期和严寒、寒冷地区以外的热工区域,建筑物室内外温差小,测量过程中的仪器误差和测量误差对测量结果的影响增大。因此一些研究者研究用热箱现场检测围护结构传热系数,这样做既可以提高墙体内外侧的温差,降低仪器误差和测量误差,当热箱位于墙体外表面时,热箱

收稿日期:2011-01-18

作者简介:邹定华(1976-),男,博士,主要从事建筑材料研究,(E-mail)zdh611\_76@163.com。

又可有效屏蔽天气变化对被测区域传热的影响,使被测墙体接近于稳态传热。但是这样做也有2个缺点:1)虽然被测区域接近于稳态传热,但是边缘部分仍然不能达到稳定,因此数据仍有一定的波动;2)由于被测区域与墙体其它部分存在温差,因此存在侧向热流(即不是垂直于墙体内外表面的热流),造成测试结果比真实值大。

根据项目的要求,针对以上情况,提出了采用热箱加热流计检测外墙传热系数的方法,并运用计算机模拟的方法研究了其测量过程中的误差,以期对检测设备的开发提出指导。

## 1 检测方法的检测原理

在用热箱检验建筑围护结构传热系数时,虽然被检测边缘区域很难达到稳定,但是中心区域受外界天气变化的影响已经非常小,在室内温度恒定的情况下(用空调控制室内温度),采用热箱屏蔽室外天气变化对被测区域传热的影响,以热流计和温度传感器检测中心部位的温度和热流,就能得到稳定的检测结果。图1为新型热箱法检测的示意图。

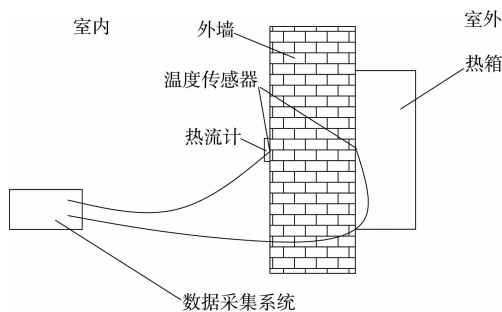


图1 热箱法示意图

此检测方法中影响检测结果最大的因素是由热箱所引起的侧向热流,这种影响可通过计算机模拟的方法计算出。应用新型热箱法检测墙体传热系数时,所需要检测的数据是热箱中心部位墙体内外侧的温度及热流计所测得的热流,根据3个数据可以计算出外墙传热系数。在传热过程的计算机模拟中,可以获得两个传热系数值。第1个值是材料的真实传热系数,这可由墙体的构造及材料参数的设定得到。第2个值是通过获取传热分析中热箱中心墙体两侧的温度及热流值所得来的“测量”值,即模拟测量过程所得到的。将这个“测量”值与真实值进行对比,可以计算出在某种情况下由侧向热流所引起的误差,从而得到一个“误差系数”。误差系数越接近于1,测量值与真实值越接近,误差越小,否则,误差越大。通过这个误差系数,可以评价在各种情

况下由侧向热流引起的的误差。

## 2 误差系数的计算公式

根据稳态传热原理,现场检测所得围护结构的传热系数:

$$\alpha_{w1} = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{\frac{\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i}{\bar{q}} + \frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i}{\bar{q}} + 0.158} \quad (1)$$

式中  $R_0$  为外围护结构传热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $\bar{\theta}_e$  为外围护结构外表面平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{\theta}_i$  为外围护结构内表面平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{q}$  为通过外围护结构的热流强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\alpha_e$  为外围护结构外表面传热系数,  $\alpha_i$  为外围护结构内表面传热系数,根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—1993),其值分别取  $23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  和  $8.7 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

而由墙体构造及材料的传热性能,外墙的真实传热系数:

$$\alpha_{w2} = \frac{1}{\sum R_i + \frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\sum R_i + 0.158} \quad (2)$$

式中  $R_i$  为外墙各层材料的热阻。

根据误差系数的定义,误差系数由下式确定:

$$\delta = \frac{\alpha_{w2}}{\alpha_{w1}} = \frac{\frac{\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i}{\bar{q}} + 0.158}{\sum R_i + 0.158} \quad (3)$$

## 3 计算机模拟的条件设定

采用 ANSYS 10.0 对图1中所示方法的测量过程进行了模拟,分析各种条件对误差系数的影响。

在热箱尺寸相对于墙体厚度足够大时,墙体内外的温差对于热箱中心部位传热的影响已经很小,因此分析中简化条件,设定室内空气温度  $t_i$  与室外空气温度  $t_e$  相同,  $t_e = t_i = 15^{\circ}\text{C}$ ;根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—1993),墙体内表面换热系数  $\alpha_i = 8.7 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,墙体外表面换热系数  $\alpha_e = 23.0 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,热箱与墙体的换热系数取  $\alpha_h = 8.7 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

武汉市目前常用的墙体材料是20、24的蒸压加气混凝土,密度的不同,加气混凝土的导热系数不同,密度为  $700 \text{ kg}/\text{m}^3$  时导热系数为  $0.22 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,密度为  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$  时导热系数为  $0.19 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,根据研究的需要,在模拟中对灰砂砖进行了分析,其导热系数取  $1.10 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ;应用较多的保温技术为胶粉聚苯颗粒外墙外保温和膨胀聚苯板外墙外保温,胶粉

聚苯颗粒保温浆料的导热系数取  $0.06 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 膨胀聚苯板导热系数取  $0.041 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

## 4 结果及分析

### 4.1 热箱尺寸效应的影响

分析中墙体构造为常用的 24 cm 加气混凝土 + 3 cm 膨胀聚苯板, 热箱尺寸分别取 0.6、1.0、1.4、1.8 m, 热箱内空气温度  $25^\circ\text{C}$ , 分析结果见图 2。从图中可以看出, 热箱尺寸对于误差系数有显著的影响。在热箱尺寸较小时, 误差系数较大, 而热箱尺寸大到一定程度时, 误差系数已经接近于 1, 测量值与真实值已非常接近, 即侧向热流所引起的误差已非常小。

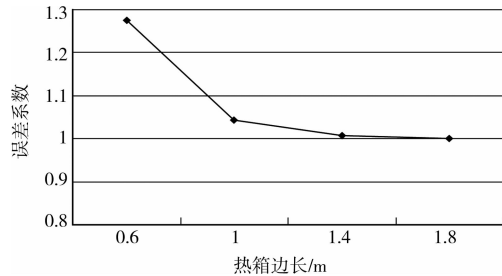


图 2 热箱尺寸对误差系数的影响

### 4.2 热箱内空气温度的影响

分析中墙体构造为 24 cm 加气混凝土 + 3 cm 膨胀聚苯板, 热箱尺寸取 1.0、1.8 m, 热箱内空气温度分别为  $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ , 分析结果见表 1。表中的结果显示, 热箱内空气温度的高低对于误差系数没有影响。这是由于热箱内温度变化后, 侧向热流的大小也随之成比例变化。但是, 实际测量中热箱内空气温度对于测试结果还是有一定影响, 因为热箱内温度提高后, 通过墙体的热流值增大, 仪器误差对于测试结果的影响降低。

表 1 热箱内空气温度对误差系数的影响

热箱尺寸/m	误差系数		
	热箱温度 $25^\circ\text{C}$	热箱温度 $30^\circ\text{C}$	热箱温度 $35^\circ\text{C}$
1	1.044	1.044	1.044
1.8	1.001	1.001	1.001

### 4.3 墙体厚度的影响

分析中墙体构造为 24 cm 加气混凝土 + 3 cm 膨胀聚苯板, 40 cm 加气混凝土 + 5 cm 膨胀聚苯板, 60 cm 加气混凝土 + 5 cm 膨胀聚苯板。热箱尺寸取 1.0、1.8 m, 热箱内空气温度  $25^\circ\text{C}$ , 分析结果见表 2。表中结果显示, 墙体构造对于误差系数有显著的影响。随着墙体厚度的增加, 误差系数显著增大。因此, 在现场检测中, 热箱尺寸的选择对于检测结果有

着直接的影响, 对于不同气候地区, 墙体的厚度不一样, 热箱的大小也不一样, 应该按照墙体厚度来选择热箱。

表 2 墙体厚度对误差系数的影响

热箱尺寸/m	误差系数		
	24 cm 加气混凝土 + 3 cm 膨胀聚苯板	40 cm 加气混凝土 + 5 cm 膨胀聚苯板	60 cm 加气混凝土 + 5 cm 膨胀聚苯板
1	1.044	1.276	5.578
1.8	1.001	1.032	1.121

### 4.4 墙体构造的影响

分析中选用 4 种厚度相同构造不同的墙体, 其构造见表 3。可以看出, 墙体构造对误差系数有影响, 不同构造的墙体误差系数不一样。而热箱尺寸不一样, 误差系数的变化不一样, 热箱尺寸越大, 误差系数的变化也越小。因此, 在用热箱现场检测传热系数时, 应尽量选择较大尺寸的热箱, 减小侧向热流对于测试结果的影响。由以上的分析来看, 对于武汉市常用的墙体构造来讲, 热箱的尺寸在 1.8 m 左右时, 侧向热流引起的误差已经在 1% 以下, 测量结果的精度得到较大的提高。

表 3 墙体构造对误差系数的影响

热箱尺寸/m	误差系数			
	24 cm 加气混凝土 + 3 cm 膨胀聚苯板	24 cm 加气混凝土 + 3 cm 胶粉聚苯颗粒	27 cm 加气混凝土	24 cm 灰砂砖 + 3 cm 膨胀聚苯板
1	1.044	1.053	1.027	1.202
1.8	1.001	1.002	1.006	1.025

## 5 新型热箱法的现场检测试验

为检测新型热箱法的实际效果, 自制了边长 1.5 m 的热箱 (由于实验空间的限制, 没有采用 1.8 m 的热箱, 且从模拟结果来看, 1.5 m 的热箱误差与 1.8 m 热箱相差很小), 采用 JTRG-II 型建筑热工温度与热流自动测试系统按图 1 所示方法对 24 cm 厚 700 级加气混凝土 + 30 mm 苯板进行现场检测。同时, 进行现场检测前在 JTRG-I 型围护结构热工性能检测热箱中对相同结构砌体进行了实验室检测。检测前加气混凝土烘干至绝干; 加气混凝土的砌筑以聚氨脂泡沫作为粘接剂, 同时起到填充接缝的作用, 加气混凝土表面不抹砂浆, 以减小加气混凝土和砂浆含水对现场检测和实验室检测结果的影响。苯板粘贴中采用凡士林找平, 以尽可能消除接触热阻。试验在一间有大窗户的房间中进行, 房间中砌  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  砌体, 同时以木框架 + 苯板的结构和砌体共同将房间分隔为 2 部分, 靠窗部分开窗, 与室外

同温度变化,作为室外部分。砌筑现场检测砌体时尽量在测量部位用实验室热箱检测所用加气混凝土砌块。试验于2007年4月12日至15日进行。试验时热箱对砌体室外侧进行加热,温度设定为40℃,室内空气温度用空调控制在20℃左右,热箱中心部位砌体表面温度、室内对应点温度及热流值由JTRG-II型建筑热工温度与热流自动测试系统自动记录。图3显示了新型热箱法检测过程中稳定后的温度和热流值,表4是现场检测和实验室热箱检测的砌体热阻值对比。图3和表4结果表明,新型热箱法检测过程中墙体表面温度和热流值稳定,其结果与实验室检测值误差在8%以下,表明新型热箱法可用于武汉地区的现场检测,而且检测结果的精度较好。

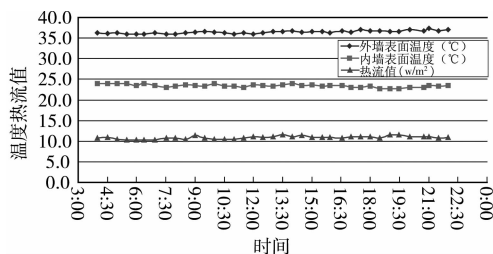


图3 现场检测过程中的墙面温度与热流

表4 现场检测和实验检测结果

现场检测结果/( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )		实验室检测结果/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	
平均值	标准偏差	平均值	结果偏差/%
0.833	0.031	0.904	7.8

## 6 结论

1) 热箱尺寸和墙体厚度是影响新型热箱法检测精度的重要因素,对于不同厚度的墙体,选择合适尺寸的热箱是降低侧向热流引起误差的技术保证。

2) 墙体构造对于检测结果的误差有影响,这种影响随着热箱尺寸的增大而减小。

3) 对于武汉市常用墙体构造,热箱边长在1.8 m时可基本消除侧向热流对于检测结果的影响。

4) 现场检测结果表明,新型热箱法现场检测结果标准偏差小,与实验检测值的偏差在10%以内。

### 参考文献:

[1] 中国建筑科学研究院. JGJ 132—2009 居住建筑节能检验标准[S].

[2] 黄峥. 两种建筑节能现场检测方法的数值研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2006(7):45-47.

HUANG ZHENG. Comparing research of the two in-situ building energy conservation test methods[J]. Wall Materials Innovation and Energy Saving in Building,

2006(7):45-47.

- [3] RAHMAN M M, RASUL M G, KHAN M M K. Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia[J]. Applied Energy, 2010, 87(10):2994-3004.
- [4] YU JING-HUA, YANG CHANG-ZHI, TIAN LI-WEI, et al. Evaluation on energy and thermal performance for residential envelopes in hot summer and cold winter zone of China[J]. Applied Energy, 2009, 86(10):1970-1985.
- [5] 王文成, 方明乐, 周泽. 建筑节能工程监督检测工作初探[J]. 建筑监督检测与造价, 2009, 13(2):7-10.
- WANG WEN-CHEN, FANG MING-LE, ZHOU ZHE. Discussions on the supervision and test work of energy-saving building engineering [J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2009, 13(2):7-10.
- [6] 田斌守, 杨永恒. 应用热流计现场检测建筑物传热系数[J]. 新型建筑材料, 2004(8):59-61.
- TIAN BING-SHOU, YANG YONG-HENG. In-site measurement of heat transfer coefficient of building by using heat meters[J]. New Building Materials, 2004 (8):59-61.
- [7] 魏晓成. 加强住宅建筑节能评价的必要性[J]. 中外建筑, 2006(3):85-86.
- WEI XIAO-CHEN. The necessity for building energy conservation assessment [J]. Chinese and Oversea Architecture, 2006(3):85-86.
- [8] 李萍, 程从亮. 传热系数现场检测中的数值模拟[J]. 新型建筑材料, 2009(10):42-44.
- LING PING, CHENG CONG-LIANG. Numerical simulation on in-situ measurement about heat transfer coefficient[J]. New Building Materials, 2009(10):42-44.
- [9] PENG CHANGHAI, WU ZHISHEN. Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes[J]. Applied Energy, 2008, 85 (8):735-754.
- [10] PENG CHANG-HAI, WU ZHI-SHEN. In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction[J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (11): 2076-2082.
- [11] YESILATA B, TURGUT P. A simple dynamic measurement technique for comparing thermal insulation performances of anisotropic building materials[J]. Energy and Buildings, 2007, 139:1027-1034.
- [12] PENG C, WU Z. Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes[J]. Applied Energy, 2008, 85:735-754.
- [13] ISO. ISO 9869-1994. Thermal insulation-Building elements-In-situ measurement of thermal resistance and

thermal transmittance[S]. [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?ics1=91&ics2=120&ics3=10&csnumber=17746](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=91&ics2=120&ics3=10&csnumber=17746).

- [14] ASTM. ASTM C1046-95 Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components [S]. <http://www.astm.org/Standards/C1046.htm>.
- [15] ASTM. ASTM C1155-95 Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data[S]. <http://www.astm.org/Standards/C1155.htm>.

[astm.org/Standards/C1155.htm](http://www.astm.org/Standards/C1155.htm).

- [16] 杨晚生. 太阳辐射对围护结构热流密度的现场检测误差分析[J]. 建筑节能, Vol37(7), 2009: 70-71.
- YANG WAN-SHENG. Error analysis of on-site detecting heating flux for envelope structure by solar radiation[J]. Construction Energy Conservation, 2009, 37(7): 70-71.

(编辑 胡玲)

(上接第123页)

- [7] SHEARER M J, TAM V H Y, CORR B. Analysis of results from large scale hydrocarbon gas explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(2): 167-173.
- [8] QIAN X M, CHEN L S, FENG C G. Simulation analysis of indoor gas explosion damage[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(3): 286-289.
- [9] 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型[J]. 力学进展, 2006, 36(3): 389-405.
- NING J G, SHANG L, SUN Y X. The developments of dynamic constitutive behavior of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(3): 389-405.
- [10] 肖诗云. 混凝土率型本构模型及其在拱坝动力分析中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [11] GROTESD L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(9): 869-886.
- [12] YUAN L, GONG S F, JIN W L. Spallation mechanism of RC slabs under contact detonation[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(6): 464-469.
- [13] ABBAS H, GUPTA N K, ALAM M. Nonlinear

response of concrete beams and plates under impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8/9): 1039-1053.

- [14] XU K, LU Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading [J]. Computers and Structures, 2006, 84(5/6): 431-438.
- [15] 盛利. 爆炸作用下钢筋混凝土梁动力响应数值模拟[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007.
- [16] 李国强, 周昊圣, 郭士雄. 火灾下钢结构建筑楼板的薄膜效应机理及理论模型[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 40-47.
- LI G Q, ZHOU H S, GUO S X. Mechanism and theoretical model of membrane action in slabs of steel buildings subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 40-47.
- [17] 江见鲸, 王元清, 龚晓南, 等. 建筑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [18] 杨俊慧. 豚鼠低强度爆震聋后耳蜗细胞凋亡及其相关基因表达的变化[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.

(编辑 胡玲)