

# 金属连接件对保温与结构一体化墙体热工性能影响实验研究 及模拟验证

## Experimental Study and Simulation Verification of Influence of Metal Connector on Thermal Performance of Thermal Insulation and Structural Integration System

李永<sup>1,2</sup>, 郝文辉<sup>2</sup>, 赵彦彦<sup>3</sup>, 郭朝辉<sup>1</sup>, 任治立<sup>4</sup>

- 河北省建筑工程质量检测中心有限公司, 河北 石家庄 050227;
- 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018;
- 河北建研工程技术有限公司, 河北 石家庄 050227;
- 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 为了验证采用模拟计算的方法研究金属连接件对保温与结构一体化墙体热工性能影响的准确性与可靠性, 首先依据 (GB/T 13475—2008) 《绝热 稳态传热性质的测定 标定和防护热箱法》规定的防护热箱法, 制作实验墙体, 并在实验台上分别对锚入金属连接件数量为 3、6 和 9 个的保温与结构一体化墙体进行了实验研究, 获取了墙体的实测传热系数。随后利用 Airpak 计算流体力学软件建立与实验研究相同的三组模型, 并设置了相同的热室与冷室温度工况, 分别计算其传热系数。最后对实测结果与模拟结果进行了对比。结果表明: 锚入金属连接件数量为 3、6 和 9 个时的保温与结构一体化墙体平均相对误差分别为 4.92%、4.69% 和 3.96%, 模拟计算误差均在 5% 范围内, 满足工程计算要求。

**关键词:** 防护热箱法; 金属连接件; 传热系数; 相对误差

**中图分类号:** TU55+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0163-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.028

LI Yong<sup>1,2</sup>, HAO Wenhui<sup>2</sup>, ZHAO Yanyan<sup>3</sup>, GUO Zhaohui<sup>1</sup>, REN Zhili<sup>4</sup>

- Hebei Province Center for Building Quality Inspection Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
- Hebei University of Science and Technology College of Civil Engineering, Shijiazhuang 050018, China;
- Hebei Building Research Engineering Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
- Chongqing University School of Civil Engineering, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** In order to verify the accuracy and reliability of using the method of simulation calculation to study the influence of metal connectors on the thermal performance of thermal insulation and structural integration wall, the experimental wall is first made according to the protective hot box method stipulated in "Determination and Calibration of Thermal Insulation Steady State Heat Transfer Properties and Protective hot box Method" (GB/T 13475—2021). experimental study is carried out on three, six and nine insulation and structural integration walls with anchored metal connectors on the experimental platform, and the measured heat transfer coefficients of the walls are obtained. Then Airpak computational fluid dynamics software is used to establish the same three groups of models as the experimental

## 研究与应用

study, and set the same hot chamber and cold chamber temperature conditions, respectively, to calculate their heat transfer coefficients. Finally, the measured results are compared with the simulated ones. The results show that the average relative errors of insulation and structural integration wall are 4.92%, 4.69% and 3.96% respectively when the number of anchored metal connectors is 3, 6 and 9, and the simulation errors are all within 5%, which meet the requirements of engineering calculation.

**Keywords:** protective hot box method; metal metal connector; heat transfer coefficient; the relative error

## 0 引言

对围护结构传热系数的修正是准确判断建筑节能效果的重要途径,而墙体及其构件作为围护结构热量流失的主要部分<sup>[1-2]</sup>,其保温隔热性的好坏直接影响到建筑的节能效果<sup>[3]</sup>。围护结构的传热系数检测可以为建筑节能效果的优劣提供参考,也对围护结构中保温材料修正系数的合理化有着深远的意义。目前,已经有大量学者对不同类型墙体的性能进行研究<sup>[4-7]</sup>,但主要集中对金属连接件的受力性能以及墙板整体力学性能的研究,关于金属连接件对保温与结构一体化墙体的热工性能影响研究较少,且在现行 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》<sup>[8]</sup>中,也未提及围护结构中构件对其传热系数造成的影响,只是给出了围护结构中不同保温材料导热系数的综合修正系数。因此,研究金属连接件对保温与结构一体化墙体热工性能影响的分析显得十分重要。本文首先依据(GB/T 13475—2008)《绝热稳态传热性质的测定 标定和防护热箱法》<sup>[9]</sup>规定的防护热箱法,制作实验墙体,并在实验台上对分别锚入数量为3、6、9个金属连接件的保温与结构一体化墙体进行了实验研究,获取了墙体的实测传热系数,此后利用 Airpak 计算流体力学软件建立与实验研究相同模型、热室与冷室温度工况,计算其传热系数,对实测结果与模拟结果进行了对比。

## 1 试验

### 1.1 试验方法、原理及装置

试验采用防护热箱法,实验设备符合 GB/T 13475—2008《绝热稳态传热性质的测定 标定和防护热箱法》<sup>[9]</sup>规定的要求。设备由五部分组成:试件框、冷箱、防护箱、计量箱及软件控制系统。试验原理如图1所示。试件尺寸为1.59 m×1.59 m,计量箱的尺寸为1.20 m×1.20 m。计量箱被防护箱围绕,控制防护箱的环境温度可以使试件内的不平衡

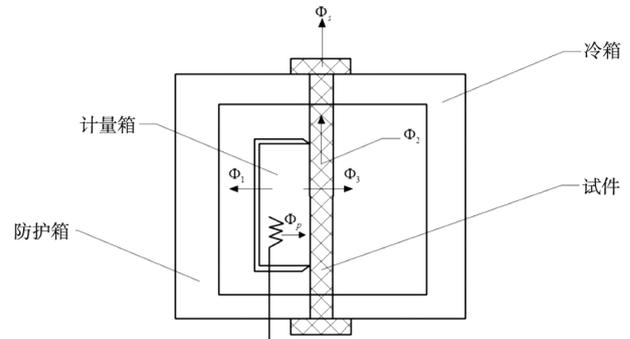


图1 实验原理图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment

热流量  $\Phi_2$  和通过计量箱壁的热流量  $\Phi_3$  降到最低限度,其中不平衡热流量  $\Phi_2$  为0;实验时,将试件放置在已知环境温度的热室与冷室之间,在稳定状态下测量空气温度和表面温度以及输入热室的功率  $\Phi_p$ ,由这些测量数值,根据式(1)~式(10)可计算出试件的传热系数。

$$\Phi_1 = \Phi_p - \Phi_2 - \Phi_3 \quad (1)$$

通过计量壁的热流量:

$$\Phi_3 = M_3(T_{si3} - T_{sc3}) \quad (2)$$

通过试件计量面积的热流量:

$$\Phi_1 = \Phi_p - \Phi_3 \quad (3)$$

热侧参与辐射换热表面的平均辐射温度:

$$T_{m2} = (T_{r2} + T_{s2})/2 \quad (4)$$

热侧辐射换热系数:

$$h_{r1} = 4\sigma T_{m13}^3 \quad \text{取 } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad (5)$$

热侧环境温度:

$$T_{a1} = \frac{T_{a1}\Phi_1/A + \varepsilon h_{r1}(T_{a1} - T_{r1})T_{s1}}{\Phi_1/A + \varepsilon h_{r1}(T_{a1} - T_{r1})} \quad (6)$$

冷侧参与辐射换热表面的平均辐射温度:

$$T_{m2} = (T_{r2} + T_{s2})/2 \quad (7)$$

冷侧辐射换热系数:

$$h_{r2} = 4\sigma T_{m23}^3 \quad \text{取 } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad (8)$$

冷侧环境温度：

$$T_{n2} = \frac{T_{a2}\Phi_1/A + \varepsilon h_{r2}(T_{a2} - T_{r2})T_{s2}}{\Phi_1/A + \varepsilon h_{r2}(T_{a2} - T_{r2})} \quad (9)$$

试件传热系数：

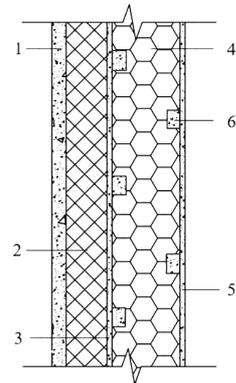
$$K = \frac{\Phi_1}{A(T_{n1} - T_{n2})} \quad (10)$$

式中： $\Phi_1$  为通过试件计量面积的热流量，W； $\Phi_2$  为不平衡热流量，W； $\Phi_3$  为通过计量箱壁的热流量，W； $\Phi_p$  为输入热室的功率，W； $M_3$  为系数，W/K； $\varepsilon$  为内表面辐射率； $A$  为计量面积， $m^2$ ； $T_{a1}$  为热箱空气温度， $^{\circ}C$ ； $T_{a2}$  为冷箱空气温度， $^{\circ}C$ ； $T_{r1}$  为热侧导流屏温度， $^{\circ}C$ ； $T_{r2}$  为冷侧导流屏温度， $^{\circ}C$ ； $T_{s1}$  为试件热侧温度， $^{\circ}C$ ； $T_{s2}$  为试件冷侧温度， $^{\circ}C$ ； $T_{si3}$  为热箱内侧温度， $^{\circ}C$ ； $T_{se3}$  为热箱外侧温度， $^{\circ}C$ ； $T_{n1}$  为试件热侧环境温度， $^{\circ}C$ ； $T_{n2}$  为试件冷侧环境温度， $^{\circ}C$ ； $K$  为传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； $h_{r2}$  为冷侧辐射换热系数， $W/(m^2 \cdot K^4)$ ； $h_{r1}$  为热侧辐射换热系数， $W/(m^2 \cdot K^4)$ ； $T_{m2}$  为冷侧参与辐射换热表面的平均辐射温度， $^{\circ}C$ ； $T_{m1}$  为热侧参与辐射换热表面的平均辐射温度， $^{\circ}C$ 。

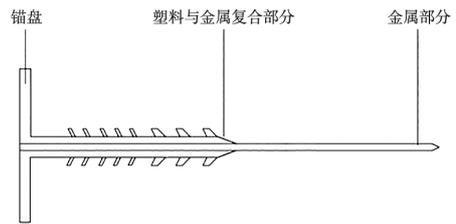
### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 实验对象

本次实验对象为保温与结构一体化墙体，钢筋混凝土厚度为 200 mm，复合保温板（总厚度为 120 mm）置于钢筋混凝土外侧，复合保温板构造详图如图 2（a）所示。金属连接件采用金属与工程塑料复合的结构形式，金属连接件由金属部分、塑料部分和锚盘构成，锚盘直径为  $\phi 80$ ，锚栓直径为  $\phi 8$ ，锚栓长 220 mm，其中塑料与金属复合部分为 100 mm，金属部分为 120 mm。金属连接件示意图如图 2（b）所示。



(a) 复合保温板构造图



(b) 金属连接件示意图

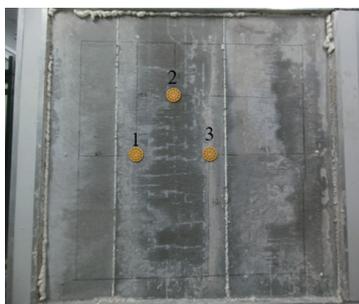
图 2 复合保温板金属连接件

Fig. 2 Composite insulation board metal connector

1—粘结增强层（聚合物抹面胶浆 7 mm 厚，内嵌耐碱玻纤网格布）；2—保温过渡层（胶粉聚苯颗粒浆料，40 mm 厚）；3—粘结层（胶粘剂，内嵌耐碱玻纤网格布）；4—保温层（挤塑板，70 mm 厚）；5—底衬（聚合物抗裂砂浆 3 mm 厚，内嵌耐碱玻纤网格布）；6—加强肋（保温层芯板长向双面开通长扇形槽，槽宽 5 mm，槽深 4 mm，加强肋间距 45 mm）

#### 1.2.2 金属连接件位置

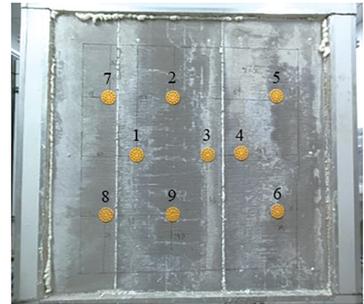
考虑到金属连接件均匀分布并避开拼缝等问题，分别对锚入金属连接件数量为 3、6 和 9 个的保温与结构一体化墙体进行了试验研究如图 3 所示，试件的具体位置见表 1。



(a) 金属连接件 3 个



(b) 金属连接件 6 个



(b) 金属连接件 9 个

图 3 金属连接件设置数量及位置

Fig. 3 Number and position of metal connectors

## 研究与应用

表 1 锚入墙体的金属连接件具体位置

Table 1 Specific positions of metal connectors anchored into the wall

编号	距计量箱上边缘距离/cm			距计量箱左边缘距离/cm		
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 1	试件 2	试件 3
1	59.4	59.4	59.4	27.2	27.2	27.2
2	26.0	26.0	26.0	51.0	51.0	51.0
3	58.0	58.0	58.0	71.4	71.4	71.4
4	—	57.5	57.5	—	90.5	90.5
5	—	24.0	24.0	—	111.0	111.0
6	—	91.0	91.0	—	112.5	112.5
7	—	—	26.7	—	—	18.0
8	—	—	91.0	—	—	11.0
9	—	—	91.0	—	—	48.0

### 1.3 试验结果及计算

试验时,热室温度设置为 35 ℃,冷室温度设置为 -10 ℃,计量箱温度设置为 35 ℃,设备进入稳态时判断参数详见表 2,并且参数不单调变化。实验时,由于室温波动、试件安装具体情况和拼缝处理效果等会对实验结果造成一定的误差,以 4 次实验的平均值作为最终结果。金属连接件数量为 3、6 和 9 个的保温与结构一体化墙体的传热系数测试结果见表 3。

表 2 设备进入稳态判断参数

Table 2 Parameters for determining the steady state of the device

传热系数 /%	加热功率 /%	热室空气 温度/℃	冷室空气 温度/℃	防护箱 温度/℃
0.5	0.5	0.2	0.3	0.3

表 3 保温与结构一体化墙体传热系数测试结果

Table 3 Test results of heat transfer coefficient of wall integrated with insulation and structure  $[W/(m^2 \cdot K)]$

实验次数/次	3 个	6 个	9 个
1	0.418	0.438	0.469
2	0.414	0.439	0.470
3	0.409	0.437	0.462
4	0.413	0.436	0.465
平均值	0.414	0.434	0.467

## 2 数值模拟计算

### 2.1 模拟条件

利用计算流体力学软件 Airpak 对墙体的稳态传热进行数值模拟验证,通过墙体的热流量推导墙体的平均传热系数,按照实验的试件尺寸对模型建模,建模及参数设置条件如下:

(1) 物理模型选用室内零方程模型,墙体内外表面的热边界条件按第三类边界条件设置<sup>[5]</sup>;

(2) 模拟采用冬季工况,外表面热阻为  $0.04 m^2 \cdot K/W$ ,模拟设置冷室的设定温度为 -10 ℃;内表面热阻为  $0.11 m^2 \cdot K/W$ ,模拟设置热室的设定

温度为 35 ℃;

(4) 按照实验试件尺寸,墙体长×宽为 1.59 m×1.59 m,面积为 2.5281 m<sup>2</sup>;

(5) 墙体材料性能参数设置,见表 4。

表 4 墙体材料性能参数

Table 4 Performance parameters of wall materials

构造层	材料类型	导热系数 / $[W/(m \cdot K)]$	修正 系数	厚度 /mm
基层墙体	钢筋混凝土	1.740	1.0	200
底衬	聚合物抗裂砂浆	0.930	1.0	3
保温层	挤塑板	0.036	1.0	70
保温过渡层	胶粉聚苯颗粒	0.083	1.0	40
粘结增强层	聚合物抹面胶浆	0.930	1.0	7
金属连接件	钢筋	58.20	1.0	锚入基层 墙体 100 mm

注:组成复合保温板的挤塑板和胶粉聚苯颗粒导热系数为实测值。

复合保温板平均传热系数可按下式计算:

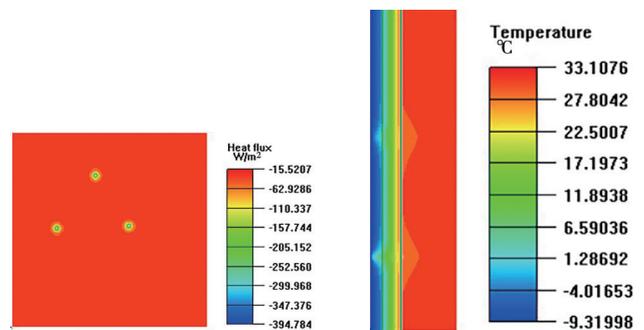
$$K = Q/A(t_1 - t_2) \quad (11)$$

式中:K 为传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ; Q 为通过墙体的热流量, W; A 为墙体的外表面积, m<sup>2</sup>; t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 分别为模拟设置热室的设定温度和模拟冷室设定的温度, ℃。

### 2.2 模拟结果

通过模拟,保温与结构一体化墙体锚入 3、6 和 9 个金属连接件时,其外表面热流密度分布与纵截面温度分布如图 4 所示。

由图 4 可知,热流密度极值出现在金属连接件周围,在 3、6 和 9 个金属连接件布置的情况下,靠近金属连接件部位的热流密度远大于其他部位,说明金属连接件附近的墙体热桥效应较为明显,尤其是金属连接件金属部位,通过数值模拟得到通过墙体的热流量分别为 26.00、27.40 和 29.20 W。



(a) 3 个连接件的外表面热流密度

(b) 3 个连接件的纵截面温度

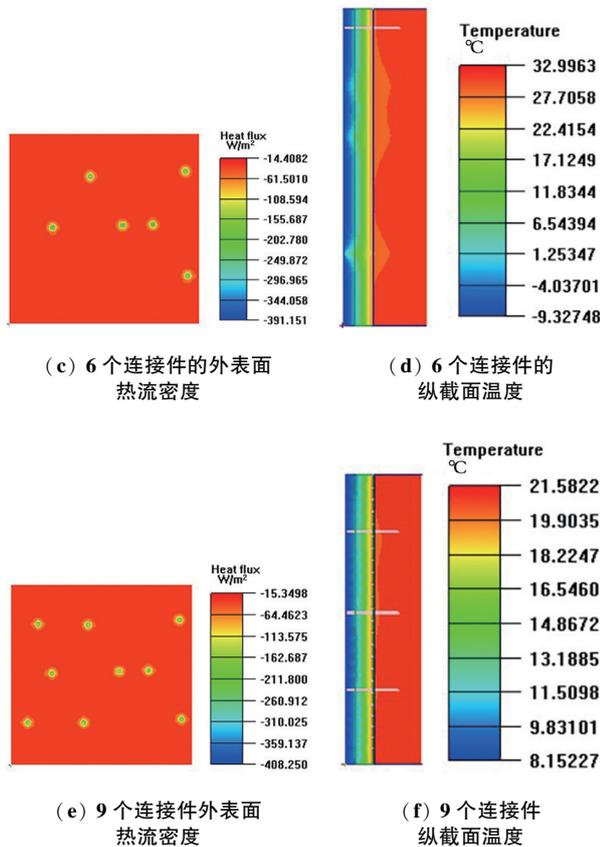


图4 墙体外表面热流密度和纵截面温度模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heat flux on the outer surface of the wall and temperature distribution in longitudinal section

根据公式 (11) 可分别计算出锚入不同数量金属连接件的墙体的平均传热系数, 锚入金属连接件 3、6 和 9 个时墙体平均传热系数模拟计算结果分别为 0.393、0.417 和 0.448  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

### 3 试验结果与模拟结果的对比

通过数值模拟与实验数据验证分析, 保温与结构一体化墙体传热系数的模拟与实测对比结果见表 5。

由表 5 分析可知, 模拟计算误差均在 5% 范围内, 满足工程计算要求。

表 5 墙体传热系数模拟与实测结果对比表

Table 5 Comparison of simulation and measurement results of wall heat transfer coefficient

项目	3 个	6 个	9 个
模拟结果/ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	0.393	0.417	0.448
实测平均值/ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	0.414	0.434	0.434
相对误差/%	4.92	4.69	3.96

## 4 结论

通过采用防护热箱法对分别锚入不同数量的金属连接件的保温与结构一体化墙体进行传热系数的检测, 将检测结果与模拟结果进行比较可以得到以下结论:

(1) 实验结果受外界条件、实际安装情况和拼缝处理效果等影响较大, 应取多次实验的平均值作为最终实验结果。

(2) 保温与结构一体化墙体锚入金属连接件数量为 3、6 和 9 个时, 模拟计算与实验结果的平均相对误差分别为 4.92%、4.69%、3.96%, 均在 5% 范围内, 说明模拟结果合理, 满足工程计算要求, 具有可靠性。

因此, 在进行保温与结构一体化墙体建筑节能设计时, 可以应用本文提供的方法进行数值模拟, 即根据材料基本热物性参数对复合墙体稳态传热进行模拟以获得其平均传热系数, 在结构设计时考虑金属连接件引起的热桥效应, 并对墙体的传热系数进行适当调整。

## 参 考 文 献

- [1] 陈师栩. 围护结构传热系数检测方法分析及应用探讨 [J]. 广东建材, 2022, 38 (8): 41-44+19.
- [2] 李爽, 周玉琼. 民用建筑节能检测之常用外墙保温隔热材料检测分析 [J]. 智能城市, 2020, 6 (16): 106-107.
- [3] 王常霖, 沈晓, 成洪波, 等. 新型装配式保温装饰结构一体化墙体系统热工性能研究 [J]. 建筑节能 (中英文), 2022, 50 (7): 64-69.
- [4] 薛伟辰, 付凯, 秦珩. 预制夹芯保温墙体 FRP 金属连接件抗拉强度加速老化实验研究 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (3): 420-424.
- [5] 蒋勤俭, 吴焕娟, 祁成财, 等. 非组合夹芯保温外墙体用非金属连接件的力学性能实验研究 [J]. 建筑技术, 2018, 49 (1): 72-76.
- [6] 吴方伯, 宋瑞, 邓利斌, 等. 新型夹心保温墙体设计及其金属连接件剪切性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015 (7): 62-65.
- [7] 程定硕. 金属连接件及拼接形式对预制夹芯保温墙体热工性能的影响研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学. 2021.
- [8] GB 50176—2016, 民用建筑热工设计规范 [S].
- [9] GB/T 13475—2008, 绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法 [S].