

文章编号:1000-582X(2010)05-126-07

几种复合墙体构造的热工性能数值分析

王厚华, 庄燕燕, 吴伟伟, 吴宏伟

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400044)

摘要: 鉴于夏热冬冷地区的气候特点, 针对内外保温形式、保温厚度、保温材料、主体墙不同的情况, 建立物理数学模型, 计算材料及墙体构造特性, 采用 *Fluent* 软件模拟对比分析不同构造墙体的热工性能, 并将内外壁面温度(夏季)进行对比。模拟结果表明: 在同一温度波连续作用下, 墙体外壁面平均温度与墙体构造基本无关; 对比热惰性指标和传热系数相同但保温形式不同的墙体构造, 外保温墙体比内保温墙体温度波衰减度大, 延迟时间更长, 内壁面温度波动幅度小, 抵抗室外温度波变化能力强, 热稳定性更好; 对比主体墙材料相同但保温材料不同的墙体构造, 说明热惰性指标和传热系数并不能完全用来综合评价保温隔热效果, 温度衰减倍数大的材料节能性能更好。

关键词: 节能; 热工性能; 内壁面温度; 热稳定性

中图分类号: TU111

文献标志码: A

Numerical analysis on the thermal performance of several kinds of composite wall construction

WANG Hou-hua, ZHUANG Yan-yan, WU Wei-wei, WU Hong-wei

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: According to climatic characteristics of the hot summer and cold winter zone, P. R. China and considering the different forms of interior and exterior insulation, different thickness of insulation, different materials of insulation and different forms of the main wall, this paper developed a physical model and a mathematic model, calculated the characteristics of materials and wall construction. It used the software *Fluent* to analyze thermal performance of different types of walls, to compare the interior and exterior surface temperature. The results of simulation show that under the condition of the same continuous temperature-wave, there are basically irrelative between the external surface average temperature and wall constructions. Compared among those construction with the same index of thermal inertia and heat transmission coefficient, but the different insulation-form, it shows that the exterior insulation has more attenuation and longer delay time than interior insulation, and the interior surface has less fluctuations of temperature, stronger resistance against wave changes in outdoor temperature and better thermal stability. Under the same main wall material with different insulation materials, it shows that the heat transfer coefficient and thermal inertia can't be used to comprehensively value the effect of thermal insulation, and the materials with more temperature attenuation have better energy-saving

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01A05)

作者简介: 王厚华(1952-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事强化传热、建筑节能方向的研究,

(E-mail) zyy@cqu.edu.cn.

materials performance.

Key words: energy conservation; thermal performance; the interior surface temperature; thermal stability

热惰性指标 D 和传热系数 K 是评价围护结构热工性能的两个重要参数。 D 是表征围护结构对温度波衰减快慢程度的无量纲指标。夏热冬冷地区围护结构各部件的 K 和 D 应符合表 1 规定^[1]。 D 值的大小直接关系到温度波衰减度和延迟时间。 D 值越大,温度波衰减得越快,围护结构的热稳定性越好。根据热舒适指标的影响因素^[2-6],在同等外界环境且不减少室内热舒适感的条件下,(夏季)若墙体内部壁面温度低,可适当提高室内空气温度,降低夏季空调能耗,进而达到节能目的。

为满足表 1 的规定,夏热冬冷地区居住建筑围护结构必须采取保温隔热措施。构造墙体保温隔热,多从减少围护结构的冷(热)负荷降低建筑能耗考虑节能效果^[7-11];降低(夏季)或提高(冬季)围护结构内表面温度^[12]从而提高建筑室内热环境的热舒适度的相关研究较少,主要定量对比分析不同保温情况下的内外壁面温度和热稳定性。且表 1 规定的 K 、 D 限值基于夏热冬冷地区建筑节能 50% 的目标,可由能耗模拟软件计算得出,实验结果也充分证实了其规定的合理性,但仍然缺乏充分的理论分析。鉴于夏热冬冷地区的气候特征,针对内外保温、同种保温材料不同保温厚度、不同保温材料、不同主体墙情况,采用 Fluent 软件模拟研究不同复合墙体构造的热工性能,根据模拟结果分析不同构造墙体的热稳定性和保温隔热效果。

表 1 围护结构各部件的传热系数 K ($W/(m^2 \cdot K)$) 和热惰性指标 D

屋顶	外墙	外窗(含阳台分户墙门透明部分)和楼板	底部自然通风的架空楼板	户门
$K \leq 1.0$	$K \leq 1.5$			
$D \geq 3.0$	$D \geq 3.0$	按表 4.0.4 的规定	$K \leq 2.0$	$K \leq 1.5$
$K \leq 0.8$	$K \leq 1.0$		$K \leq 1.5$	$K \leq 3.0$
$D \geq 2.5$	$D \geq 2.5$			

说明:当屋顶和外墙的 K 值满足要求,但 D 值不满足要求时。应按照《民用建筑热工设计规范》GB 50176—1993 第 5.1.1 条来验算隔热设计要求。表 1 中外窗部件热工性能见《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》表 4.0.4。

1 材料及墙体构造特性计算

1.1 衰减倍数

ν_0 :围护结构内侧空气温度稳定,外侧受室外综合温度谐波作用,室外综合温度谐波波幅与围护结构内表面温度谐波波幅的比值。采用式(1)^[13]计算

$$\nu_0 = 0.9e^{\frac{\sum D}{\sqrt{e}}} \cdot \frac{S_1 + h_i}{S_1 + Y_1} \cdot \frac{S_2 + Y_1}{S_2 + Y_2} \dots \frac{S_n + Y_{n-1}}{S_n + Y_n} \cdot \frac{Y_n + h_e}{h_e} \quad (1)$$

其中: ν_0 为围护结构的衰减倍数; e 为自然对数的底, $e=2.71828$; $\sum D$ 为多层围护结构 D 之和; h_i 为室内表面对流换热表面传热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; $S_1, S_2 \dots S_n$ 为从内到外各层材料蓄热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ 为从内到外各层材料外表面蓄热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; h_e 为室外表面对流换热表面传热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]。

1.2 延迟时间

ξ_0 :围护结构内侧空气温度稳定,外侧受室外综合温度谐波作用,围护结构内表面温度谐波最大值出现时间与室外综合温度谐波最大值出现时间的差值,采用式(2)^[13]计算

$$\xi_0 = \frac{1}{15} (40.5 \sum D - \arctan \frac{h_i}{h_i + \sqrt{2}Y_i} + \arctan \frac{Y_e}{Y_e + \sqrt{2}h_e}), \quad (2)$$

其中: ξ_0 为围护结构的延迟时间 h ; Y_i 为多层围护结构内表面蓄热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; Y_e 为多层围护结构外表面蓄热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]。

1.3 热惰性指标

1)单一材料围护结构 D 值采用式(3)计算

$$D = RS = \delta \sqrt{\frac{2\pi C_p \rho}{\lambda T}}, \quad (3)$$

式中: R 为材料层的热阻 [$(m^2 \cdot K)/W$]; S 为材料的蓄热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; δ 为材料的厚度 m ; C_p 为材料的比热容 [$J/(kg \cdot K)$]; ρ 为材料的密度 [kg/m^3]; λ 为导热系数 [$W/(m \cdot K)$]; T 为波动周期(s)。

2)多层围护结构 D 值采用式(4)计算

$$\sum D = \sum_{i=1}^n R_i S_i. \quad (4)$$

1.4 蓄热系数和表面蓄热系数

$$S = A_q / A_t = \sqrt{\frac{2\pi\lambda C_p \rho}{T}} \quad (5)$$

式中: A_q 为材料表面的热流波振幅; A_t 为表面温度波振幅。

表面蓄热系数: 周期性热作用下, 物体表面温度升高或降低 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在 1 h 内, 1 m^2 表面贮存或释放的热量。计算如下^[14]。

1) 多层围护结构各层外表面蓄热系数, 应按下列规定由内向外逐层计算, 见图 1。

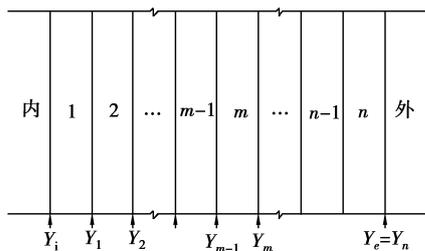


图 1 多层围护结构层次排列

如果任何一层的 $D \geq 1$, 则 $Y = S$, 即取该层材料的蓄热系数。

$$\text{如果 } D_1 < 1, \text{ 则 } Y_1 = \frac{R_1 S_1^2 + h_i}{1 + R_1 h_i} \quad (6)$$

$$\text{如果 } D_2 < 1, \text{ 则 } Y_2 = \frac{R_2 S_2^2 + Y_1}{1 + R_2 Y_1} \quad (7)$$

.....

$$Y_n = \frac{R_n S_n^2 + Y_{n-1}}{1 + R_n Y_{n-1}} \quad (8)$$

式中: $R_1, R_2 \dots R_n$ 分别为各层材料的热阻 [$(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$];

$$2) Y_e = Y_n.$$

3) 计算 Y_i 采用反算法, 算法同上, 计算应从最后一层 (第 n 层) 开始, 由外向内逐层计算, 直至第 1 层, 即求得 Y_i 。

2 数学模型

墙体非稳态传热的计算模拟过程中, 其假设条件^[7,12]如下:

- 1) 各层材料为均质, 且各向同性;
- 2) 热物性不随温度变化;
- 3) 保温材料、砂浆与主体墙紧密接触;
- 4) 无内部热源和质量源。

2.1 物理模型

取图 2 所示的外墙构造简图作为围护结构非稳态传热分析的模型, 其中墙体厚度由墙体构造决定,

墙体保温材料的位置和选择根据不同的保温形式而定。

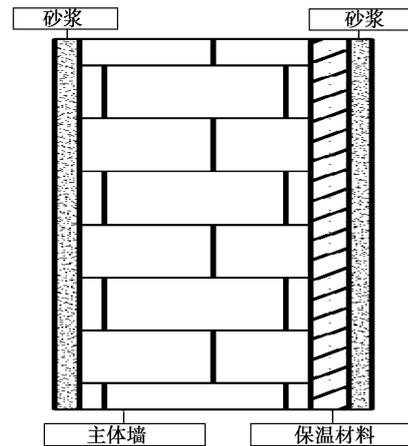


图 2 墙体的构造简图

2.2 数学描述

不同的建筑材料构成的复合墙体, 其传热过程比较复杂, 温度场为非稳态三维^[5], 根据傅立叶定律建立非稳态无内热源传热控制方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (9)$$

由以上的建筑材料的导热系数 λ 为常数的假设条件, 进一步简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) \quad (10)$$

通常建筑外墙的高度和宽度远远大于其厚度, 如墙体由多层均质材料构成, 则墙体内部的导热完全可以视为一维导热。对于单层材料构成的外墙, 在周期性热作用边界条件下, 文献[15]已通过数学方法获得了分析解, 但多层复合墙体的相关分析解尚未见到报道。当建筑外墙主体材料采用空心砌块时 (目前节能建筑中已普遍采用空心砌块), 由于空心砌块实体部分与空气间层导热系数相差较大, 空心砌块内的传热应为二维甚至三维非稳态传热, 居松茂^[16]将此问题简化为一维传热问题, 采用数值方法求出了不同孔排数、不同材料空心砌块的导热热阻, 其模拟结果与文献[17]的实测结果最大误差小于 4.3%, 证明采用一维模型可以获得足够精确的近似解。基于此, 采用一维非稳态导热模型。其导热微分方程式简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (11)$$

边界条件如下: 1) 墙体两侧均为第 3 类边界条

件,根据夏热冬冷地区的气候特点,取 $h_i = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_e = 19.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 2) 夏季空调,室内温度 t_n 恒定为 299 K ; 3) 室外温度呈简谐波规律变化,取重庆市沙坪坝气象台提供的夏季某一日的室外综合温度,进行拟合,见图 3。

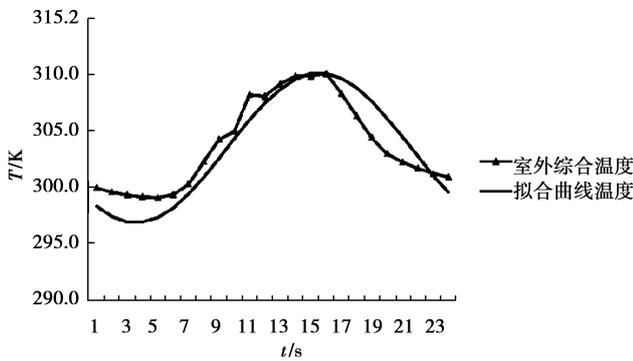


图 3 拟合曲线与实际温度曲线图

室外综合温度拟合公式如下

$$t_e = 304 + 5.4 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \times \frac{t}{3600} - 180\right), \quad (12)$$

其中: $T = 24 \text{ h}$, $t = \Delta t \times i$, $i = 0, 1, 2, \dots$ ($\Delta t = 3600 \text{ s}$)。

拟合曲线与实际温度值最大误差为 1%, 平均误差为 0.1%。

2.3 研究对象构造形式及热工参数

表 2 五种组合墙体构造

墙体	保温类型	墙体结构(由内侧到外侧)
构造 1	外保温	水泥砂浆 20 mm, 混凝土空心砌块
		190 mm, EPS30 mm, 水泥砂浆 20 mm
构造 2	外保温	水泥砂浆 20 mm, 页岩空心砖 240 mm, EPS30 mm, 水泥砂浆 20 mm
		水泥砂浆 20 mm, 混凝土空心砌块
构造 3	外保温	190 mm, EPS50 mm, 水泥砂浆 20 mm
		水泥砂浆 20 mm, EPS30 mm, 页岩空心砖 240 mm, 水泥砂浆 20 mm
构造 4	内保温	水泥砂浆 20 mm, 混凝土空心砌块
		190 mm, 胶粉聚苯颗粒 30 mm, 水泥砂浆 20 mm
构造 5	外保温	水泥砂浆 20 mm, 混凝土空心砌块
		190 mm, 胶粉聚苯颗粒 30 mm, 水泥砂浆 20 mm

选取 3 类 5 种目前常用建筑墙体构造, 见表 2: 第 1 类为基层墙体不同, 分别选择混凝土空心砌块和页岩多孔砖作为主体墙; 第 2 类是保温方式不同,

选取外保温与内保温; 第 3 类为保温材料不同, 选用膨胀型聚苯乙烯板(EPS)和胶粉聚苯颗粒。材料的热工参数见表 3^[18]。

表 3 材料的热工参数

材料名称	厚度 /mm	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	蓄热系数 $/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比热 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	热惰性指标 D
水泥砂浆	20	0.930	11.30	1800	1050	0.24
混凝土砌块	190	0.540	6.06	890	1050	1.28
页岩空心砖	240	0.580	7.87	1400	1050	3.28
EPS	30	0.042	0.36	30	1380	0.26
EPS	50	0.042	0.36	30	1380	0.43
胶粉聚苯颗粒	30	0.059	1.17	230	1380	0.49

3 模拟结果分析

3.1 不同构造墙体的外壁面温度的对比

图 4 中正坐标轴为外壁面温度坐标, 副坐标轴为内壁面温度坐标。

对比图 4(b)、(d), 组成材料相同 (D, K 相同), 但保温形式不同, 其中构造 2 墙体为外保温墙体, 构造 4 墙体为内保温墙体, 其外壁面温度波峰值分别为 308.0 和 307.0 K, 外壁面温度波谷值分别为 299 和 300.0 K, 外壁面平均温度均为 303.5 K。对比图 4(a)和(c) 组成材料相同但保温厚度不同的外保温墙体, 构造 1 墙体保温材料厚度为 30 mm, 构造 3 墙体保温材料厚度为 50 mm, 其外壁面温度波峰值均为 308.5, 外壁面温度波谷值均为 298.5 K, 外壁面平均温度为 303.5 K。对比图 4(a)、(b), 保温材料相同但主体墙材料不同的墙体构造, 其外壁面温度波峰值分别为 308.5 和 308.0 K, 外壁面温度波谷值分别为 298.5 和 299 K, 外壁面平均温度为 303.5 K, 对比图 4(a)和(e) 主体墙材料相同但保温材料不同的墙体构造, 其外壁面温度波峰值均为 308.5 K, 外壁面温度波谷值均为 298.5 K, 外壁面平均温度为 303.5 K。

综上所述: 在同一温度波连续作用下, 不同构造保温墙体外壁面温度波幅不同, 但外壁面平均温度基本相等, 且都有良好的保温节能效果, 对室内热环境舒适性都起到一定改善作用。

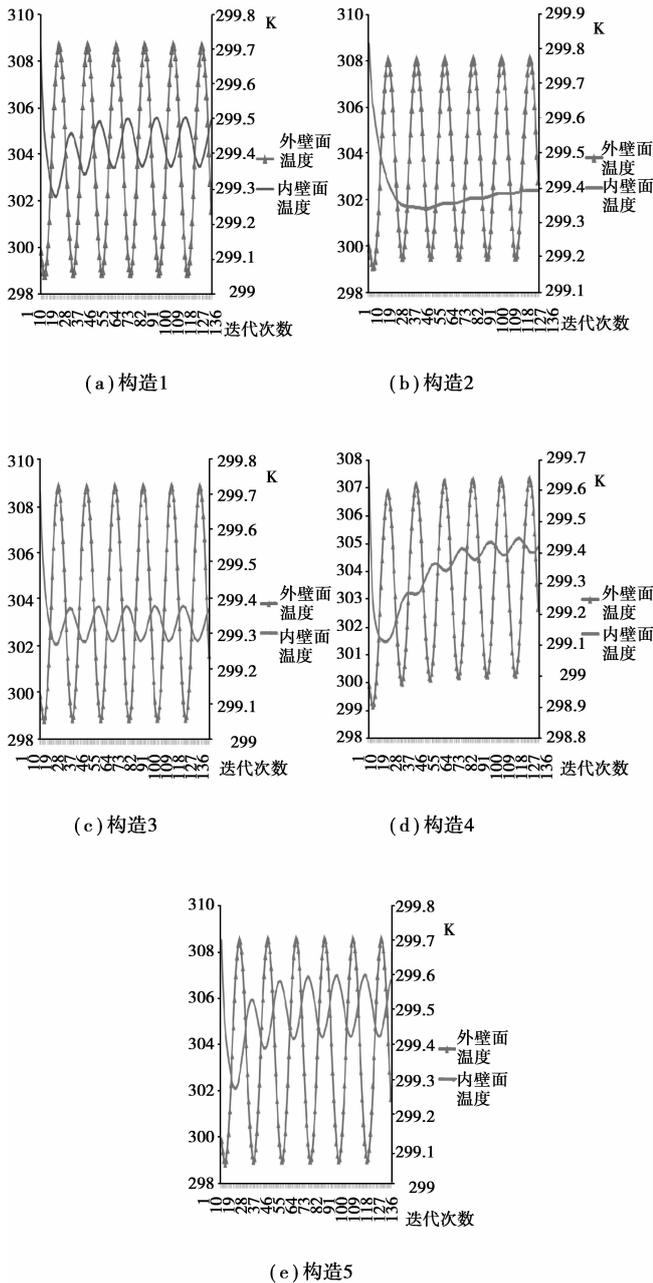


图 4 5 种墙体内外壁面温度图

表 4 不同组合墙体构造特性

墙体构造	传热系数 / (W · m ⁻² · K ⁻¹)	热惰性指标 D	温度波衰减度	延迟时间/h
1	0.79	2.88	35.68	7.74
2	0.75	4.00	84.56	10.78
3	0.57	3.05	53.29	8.21
4	0.75	4.00	73.30	10.77
5	0.94	3.21	28.15	8.66

3.2 内外保温不同时的内壁面温度的对比

对比组成材料相同 (D, K 相同), 但保温形式不同的墙体构造, 其中构造 2 为外保温墙体, 构造 4 为内保温墙体, 组成材料均为 240 mm 的页岩空心砖主体墙, 30 mm 的 EPS 保温材料。K 值均为 0.75 W/(m² · K), D 值均为 4.00。但构造 2 墙体温度波 ν_0 为 84.56, 构造 4 墙体温度波 ν_0 为 73.30, 见表 4。由图 5 可知, 在同一温度波连续作用下, 对比组成材料相同 (D, K 相同), 但保温形式不同, 外保温墙体比内保温墙体温度波 ν_0 大, 内壁面温度波动幅度小, 抵抗室外温度波变化能力强, 热稳定性更好。

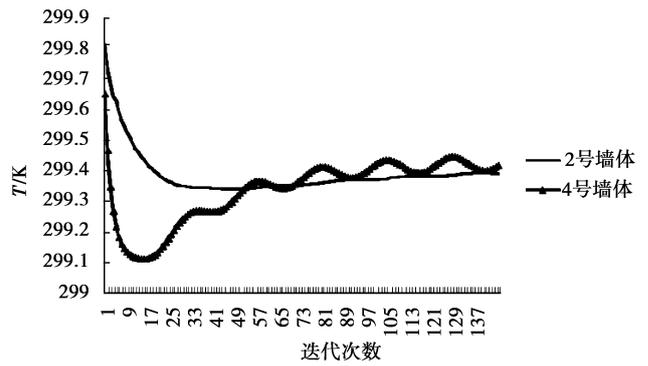


图 5 构造 2、4 墙体内壁面温度对比图

3.3 保温厚度不同时的内壁面温度对比

对比组成材料相同但保温厚度不同的墙体构造, 其中构造 1 墙体保温材料厚度为 30 mm, 温度波 ν_0 及 ξ_0 为 35.68 和 7.74 h。构造 3 墙体保温材料厚度为 50 mm, 温度波 ν_0 及 ξ_0 为 53.29 和 8.21 h 见表 4, 保温厚度对 ν_0 值的影响作用大于 ξ_0 值。由图 6 可知, 构造 3 墙体的内壁面温度较低于构造 1 墙体, 即在同一温度波连续作用下, 温度波 ν_0 大的墙体内壁面温度更低, 热稳定性更好。

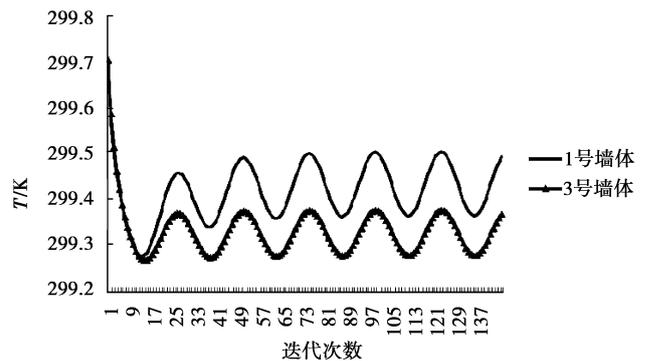


图 6 构造 1、3 墙体内壁面温度对比图

3.4 主体墙不同时的内壁面温度对比

对比保温形式相同,但主体墙材料不同的墙体构造,其中构造1墙体的主体墙是混凝土空心砌块, K 值和 D 值分别为 $0.79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 2.88 。构造2墙体的基层墙体为页岩空心砖, K 值和 D 值分别为 $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 4.00 ,见表4,由于承重墙部分有较高的蓄热系数和密度,承重墙部分共同影响 ν_0 值和 ξ_0 值。由图7可知:构造1墙体的内壁面温度低于构造4墙体,即在同一温度波连续作用,墙体 K 值相近的情况下, D 值大的墙体的内壁面温度更低,热稳定性更好,因此页岩空心砖比混凝土空心砌块更优越。

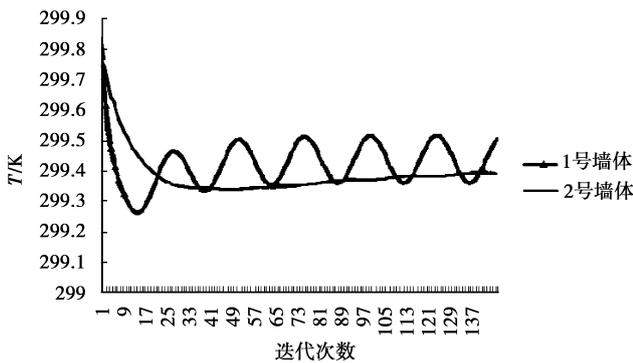


图7 构造1、2墙体内壁面温度对比图

3.5 保温材料不同时的内壁面温度对比

对比主体墙材料相同但保温材料不同的墙体构造,其中构造1墙体采用 30 mm EPS保温材料,温度波 ν_0 为 35.68 。构造5墙体采用 30 mm 胶粉聚苯颗粒保温材料,温度波 ν_0 为 28.15 ,见表4,保温材料对 ν_0 值的影响作用大于 ξ_0 值。由图8可知,构造1墙体的内壁面温度比构造5墙体更低,即在同一温度波连续作用下,温度波 ν_0 大的墙体内壁面温度更低。或者,在舒适性相同的情况下,采用衰减度大

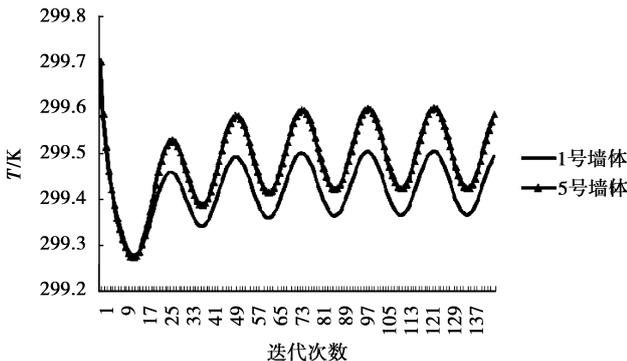


图8 构造1、5墙体内壁面温度对比图

的材料作为保温材料,由于其内表面温度更低,可适当提高室内空调温度,达到节省能耗的目的。因此,在保温厚度相同时,虽然胶粉聚苯颗粒 D 值更大,但其导热系数 λ 更大,导致温度波衰减度更小,显然其节能效果不如EPS。

综合评价以上5种复合墙体的隔热优越性,2号构造墙体最好,3号构造墙体次之,且 ν_0 值是由承重墙部分和保温部分共同决定,而 ξ_0 起决定性影响因素的是承重墙部分。

4 结论

根据气象台的实测数据,将室外综合温度随时间的变化规律拟合为简谐波规律;根据已有的研究成果,将通过不同构造外墙的传热问题简化为一维非稳态传热问题,通过数值计算方法获得了不同构造复合墙体温度分布规律,得到了如下结论。

1) 笔者的分析方法可量化比较不同保温方式、不同保温材料和不同墙体构造的保温隔热效果和节能效果,从而为围护结构外墙的节能措施提供参考。

2) 在同一温度波连续作用下,不同构造保温墙体外壁面温度波幅不同,但外壁面平均温度基本相等。说明墙体外壁面平均温度与墙体构造基本无关。

3) 对比组成材料相同(D, K 相同),但保温形式不同的墙体构造,外保温墙体比内保温墙体温度波衰减度大,延迟时间更长,内壁面温度波动幅度小,抵抗室外温度波变化能力强,热稳定性更好,室内的舒适性能更好。

4) 对比组成材料相同但保温厚度不同、主体墙材料相同但保温材料不同的墙体构造,说明温度波衰减度大的墙体温度更低,热稳定性更好。因此选择保温材料时, D 和 K 并不能完全用来综合评价保温隔热效果,温度波衰减度大的材料节能性能更好。

5) 综合评价以上5种复合墙体的隔热优越性,2号构造墙体最好,3号构造墙体次之。

6) 衰减倍数的大小是由承重墙部分和保温部分共同决定,而延迟时间起决定性影响因素的是承重墙部分。

参考文献:

[1] 中华人民共和国行业标准. JGJ 134—2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: [s. n.], 2001.
[2] 王昭俊, 廉乐明. 住宅室内热环境中影响人体热感觉特

- 征选择[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004(8): 1011-1013.
- WANG ZHAO-JUN, LIAN LE-MING. Selection on characteristic of the thermal sensation for occupants [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004(8):1011-1013.
- [3] DE DEAR R, BRAGER G, COOPER D, et al. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [R]. Sydney: Macquarie University, 1997.
- [4] BUDAIWI I M. An approach to investigate and remedy thermal-comfort problems in buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42(5): 2124-2131.
- [5] LI L. Characteristic of local thermal comfort and prediction of thermal comfort in summer [C]// International Workshop on Energy and Environment of Residential Building 2007, January 15-16, Harbin, China. Harbin, China: [s. n.], 2007: 197-200.
- [6] ALTAN H, MOHELNIKOVA J, FRIC O, et al. Windows and building envelopes and their influence on indoor thermal comfort [C]// Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international Conference on Energy & Environment, February 23-25, 2009, Cambridge, UK. [S. 1]: Energy And Environmental Engineering Series, 2009(6): 259-262.
- [7] 汤莉, 汤广发. 三种墙体保温隔热性能的数值分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2): 31-34.
- TANG LI, TANG GUANG-FA. Numerical analysis on the heat preservation and heat insulation performance of three kinds of walls [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(2): 31-34.
- [8] 兰勇, 万朝均. 建筑外墙传热系数对能耗的影响[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(6): 31-34.
- LANYONG, WAN CHAO-JUN. Impact of building outside wall heat transmission coefficient on energy consumption [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2008, 22(6): 31-34.
- [9] 南艳丽, 冯雅, 谷晋川, 等. 夏热冬冷地区热桥对节能围护结构的影响[J]. 建筑节能, 2007, 35(3): 20-23.
- NAN YANLI, FENG YA, GU JIN-CHUAN, et al. Impact s of thermal bridge on energy- saving envelope in hot summer and cold winter zone [J]. Construction Conserves Energy, 2007, 35(3): 20-23.
- [10] LI Z S, LU S H, ZHANG G Q, et al. Investigation on building external insulation facade system energy saving techniques in 'hot summer/warm winter' zone [C]// International Workshop on Energy and Environment of Residential Building 2007, January 15-16, Harbin, China. Harbin, China: [s. n.], 2007: 51-53.
- [11] GILLIAN A. External wall insulation plays prominent role in sustainable construction [J]. Concrete Engineering International, 2005, 9(4): 20-22.
- [12] 杨昭, 郁文红, 张甫仁. 节能建筑复合墙体的非稳态热工性能[J]. 天津大学学报, 2004, 37(11): 975-979.
- YANG ZHAO, YU WEN-HONG, ZHANG FU-REN. Unsteady Thermal Characteristics of Wall Insulation in Low Energy Consumption Building [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(11): 975-979.
- [13] 中国建筑科学研究院. GB 50176—1993, 民用建筑热工设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [14] 企业平台与读者信箱栏目. 外墙外保温技术百问[J]. 建筑节能, 2008, 36(1): 75-78.
- Enterprises platform and readers mail box. The result of Technology of external thermal insulation of exterior wall [J]. Construction Conserves Energy, 2008, 36(1): 75-78.
- [15] 雷柯夫. 热传导理论[M]. 裘烈均, 译. 北京: 高等教育出版社, 1956.
- [16] 居松茂. 混凝土小型空心砌块墙体的热工性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [17] 杜文英. 砼空心砌块的保温性能[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 1993(3): 10-15.
- DU WEN-YIN. Insulation performance of concrete hollow block [J]. Building Block & Block Building, 1993(3): 10-15.
- [18] 徐占发. 建筑节能常用数据速查手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

(编辑 赵 静)