

多孔砖和空心砖墙体传热过程和冷负荷谐波性能数值计算与分析^{*}

中原工学院 王晓璐[☆] 孙昆峰 黄大宇

摘要 运用有限差分法计算出多种节能多孔砖、空心砖墙体在夏季标准设计日的温度、传热量、空调冷负荷,应用傅里叶级数分析了墙体内部温度、传热量、空调冷负荷的谐波构成,得出了墙体放热衰减度和相位延迟等参数。

关键词 多孔砖墙体 空心砖墙体 有限差分法 傅里叶级数 冷负荷 谐波性能

Numerical calculation and analysis for heat transfer and cooling load harmonic performance of porous brick and hollow brick walls

By Wang Xiaolu[★], Sun Kunfeng and Huang Dayu

Abstract According to the finite difference method calculates the temperature, heat transfer capacity and air conditioning cooling load in summer design condition for some energy-saving porous brick and hollow brick walls. Analyses the harmonic structure of internal temperature, heat transfer capacity and air conditioning cooling load of the walls by the Fourier series, and obtains the heat attenuation and phase delay.

Keywords porous brick wall, hollow brick wall, finite difference method, Fourier series, cooling load, harmonic performance

★ Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, China

①

0 引言

谐波反应法是计算建筑物夏季空调冷负荷的一种重要方法,它具有方法简便、相似性能好、数学表达式完整、便于计算机分析对比的特点,广泛应用于民用及工业建筑外墙的夏季空调负荷计算中。我国现行的空调设计手册都详细给出了谐波反应法所用的公式和常用的墙体计算数据。随着我国建筑节能工作的快速发展,各种形式的新型多孔砖和空心砖被越来越广泛地应用于建筑墙体中。节能多孔砖和空心砖砌筑的墙体内部分布着一系列孔洞,使得对它们的传热及空调负荷进行谐波反应法计算相当困难,目前国内的研究只局限于测量或计算其平均导热系数

与热阻,进而得出总传热系数,由此也只能计算出冬季稳态时的热负荷^[1-4],缺乏应用谐波反应法计算新型多孔砖、空心砖墙体夏季空调冷负荷所必需的基础数据。针对这种情况,笔者对新型空心砖、多孔砖砌体内的传热过程进行了数值计算,在此基础上分析了节能多孔砖和空心砖墙体传热进程的放热衰减度和相位延迟等谐波反应性能,给出了相应的冷负荷谐波反应法计算式。

1 谐波反应法计算原理及计算过程

①[☆] 王晓璐,女,1959年9月生,大学,副教授
450007 河南省郑州市中原西路41号中原工学院能环学院
基础教学系
(0371) 65537456
E-mail: wxl@zzti.edu.cn
收稿日期:2007-07-23
一次修回:2007-10-17
二次修回:2008-01-10

1.1 计算原理

空心砖砌体和多孔砖砌体中空气自然对流过程是二维和三维非稳态对流换热过程。使用 Fluent 中的 gambit 软件建立砌体的实体模型并对其划分网格,使用有限容积法对实体模型进行数值计算,速度压力方程求解选用 SIMPLE 算法,对流扩散项采用二阶迎风格式^[5]。砌体左边界面的表面传热系数根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)取为 $h_o = 18.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。砌体右侧室内空气温度 $t_n = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, 表面传热系数 $h_n = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。砖体孔洞中空气的导热系数 λ_i 、动力黏度 μ_i 分别按 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 干空气取值。砖体固体材料的密度 $\rho = 1850 \text{ kg}/\text{m}^3$, 比定压热容 $c_p = 887.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 导热系数 $\lambda = 0.806 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。计算完成后输出空调标准设计日墙体内、外表面的温度数据文件和热流数据文件。计算中采样时间间隔为 60 s , 与传统的采样时间间隔 1 h 相比,可有效避免在高频级数部分造成误差。

夏季室外空气温度与太阳辐射是随时间以 24 h 为周期变化的,但此变化是不规则的,因此室外空气综合温度也是不规则的周期性函数。在室外空气综合温度作用下,墙体内、外表面温度及墙体内、外表面的传热量也随时间周期性变化。由傅里叶变换将它们用周期性的正弦波或余弦波级数表达^[6]。

空调设计日室外逐时综合温度

$$CLQ = \beta_d Q_r + \beta_i \left(1 - \frac{K_n}{h_n}\right) \bar{Q} + \beta_i h_n F \sum_{n=1}^m \frac{A_n}{v_n \mu_n} \sin(n\omega\tau + \varphi_n - \epsilon_n - \epsilon'_n) \quad (3)$$

当计算房间向邻室传出热量与传入热量相等

$$CLQ = \beta_d Q_r + \beta_i \bar{Q} + \beta_i h_n F \sum_{n=1}^m \frac{A_n}{v_n \mu_n} \sin(n\omega\tau + \varphi_n - \epsilon_n - \epsilon'_n) \quad (4)$$

式(3),(4)中 β_d, β_i 分别为墙体传热量中对流热量和辐射热量的比例; $\bar{Q}$ 为由室外综合温度与室内空气温度之差形成的稳态传热得热量, $\bar{Q} = KF(A_o - t_n)$; K_n 为内墙传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; μ_n 为房间对 n 阶墙体传导得热中辐射热扰量的放热衰减度^[7]; ϵ'_n 为房间对 n 阶墙体传导得热中辐射热扰量的放热相位延迟^[7], rad 。

1.2 计算过程

采用二维样条函数插值法计算出北京时间各时刻当地的太阳总辐射照度,求出各时刻当地室外

$$t_{z,\tau} = A_0 + \sum_{n=1}^m A_n \sin(n\omega\tau + \varphi_n) \quad (1)$$

式中 A_0 为设计日室外综合温度平均值; A_n 为 n 阶室外综合温度谐波的振幅, $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$; ω 为角速度, $\omega = \frac{2\pi}{T}$; φ_n 为 n 阶室外综合温度谐波的初相位角, $\varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$; n 为谐波的阶数。

傅里叶级数的系数为

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{2\pi} f(\tau) \cos(n\omega\tau) d\tau$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{2\pi} f(\tau) \sin(n\omega\tau) d\tau$$

受室外空气综合温度作用的外围护结构内表面的传热量为

$$Q_r = KF \left[A_0 - t_n + \frac{h_n}{K} \sum_{n=1}^m \frac{A_n}{v_n} \sin(n\omega\tau + \varphi_n - \epsilon_n) \right] \quad (2)$$

式中 K 为墙体的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; F 为墙体传热面积, m^2 ; v_n 为围护结构对 n 阶综合温度波扰量的衰减度; ϵ_n 为围护结构对 n 阶综合温度波扰量的相位延迟, rad 。

墙体传入房间的热量由对流热量和辐射热量两部分组成,辐射热量经室内各物体表面多次反复吸收和反射,使各物体表面温度升高后向室内空气放热,转化为瞬时冷负荷,辐射热量在转化过程中有放热衰减和放热延迟现象。

当计算房间向邻室只传出热量,不传入热量时,外围护结构内表面的传热引起的冷负荷为

$$CLQ = \beta_d Q_r + \beta_i \left(1 - \frac{K_n}{h_n}\right) \bar{Q} + \beta_i h_n F \sum_{n=1}^m \frac{A_n}{v_n \mu_n} \sin(n\omega\tau + \varphi_n - \epsilon_n - \epsilon'_n) \quad (3)$$

时,外围护结构内表面的传热引起的冷负荷为

$$CLQ = \beta_d Q_r + \beta_i \bar{Q} + \beta_i h_n F \sum_{n=1}^m \frac{A_n}{v_n \mu_n} \sin(n\omega\tau + \varphi_n - \epsilon_n - \epsilon'_n) \quad (4)$$

空气综合温度,编制三次样条函数法插值程序,计算各个城市的夏季空调设计日中 8 个朝向的 1440 个离散综合温度数值^[8],作为墙体外表面的计算边界条件。用 Fortran 语言编写了通用分析程序,根据计算结果,求解出室外空气综合温度、墙外表面的温度和热流、墙内表面的温度和热流各自的有限项傅里叶级数表达式,进行空心墙体传热性能的谐波分析。

作为计算示例之一,安阳市的东向室外空气综合温度、东向室外空气综合温度作用下 KF1 型墙

体东向墙外表面的温度、东向墙内表面的温度和热

流得出的傅里叶级数模拟结果如图 1~4 所示。

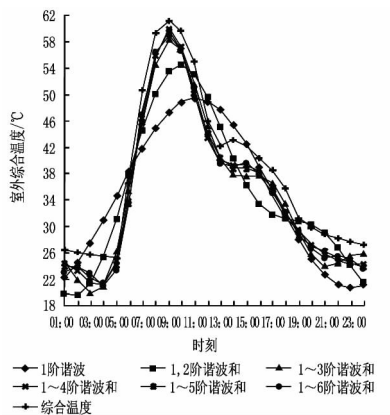


图 1 安阳市的东向室外空气综合温度波

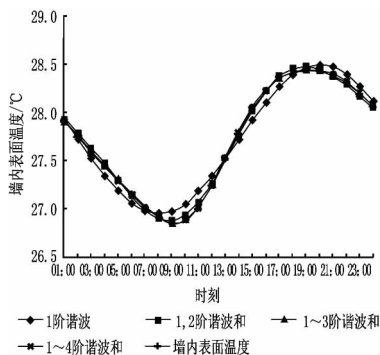


图 3 安阳市东向墙内表面的温度波

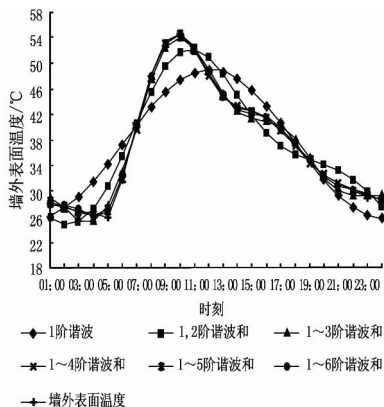


图 2 安阳市东向墙外表面的温度波

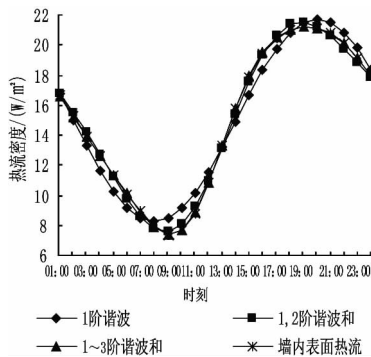


图 4 安阳市东向墙内表面的热流波

从图中可以看出,墙体对高阶谐波有明显的衰减作用,墙体内表面的温度、热流用 2~3 阶谐波之和便可准确模拟。

将室外空气综合温度、墙体内表面温度各自的傅里叶级数对比,找出两者同阶温度波的振幅比以及相位角之差,即得出新型节能多孔砖、空心砖墙体传热过程对第 n 阶综合温度波扰量的衰减度和相位延迟。

$$v_n = \frac{A_n}{A_{n,n}} \quad (5)$$

$$\epsilon_n = \varphi_n - \varphi_{n,n} \quad (6)$$

式(5),(6)中 $A_{n,n}$ 为围护结构内表面 n 阶温度波的振幅; $\varphi_{n,n}$ 为围护结构内表面 n 阶温度波的相位角,rad。

2 新型节能墙体的谐波参数

笔者计算了典型的空心砖及多孔砖砌筑的墙体,它们的具体构造尺寸如图 5~10 所示。墙体传热谐波性能见表 1。

3 节能多孔砖和空心砖墙体冷负荷的谐波反应法计算

根据上述数据可容易地计算出房间采用节能

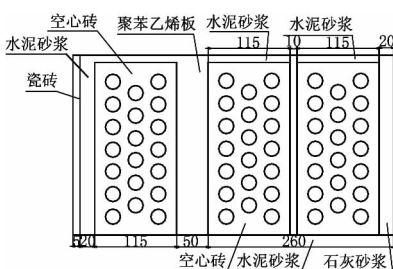


图 5 kp1-1-1 墙体结构示意图

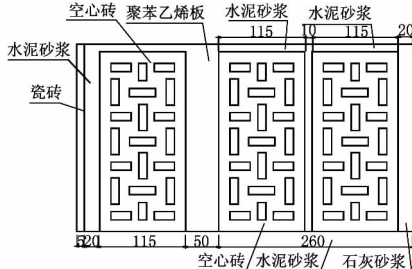


图 6 kp1-2-2 墙体结构示意图

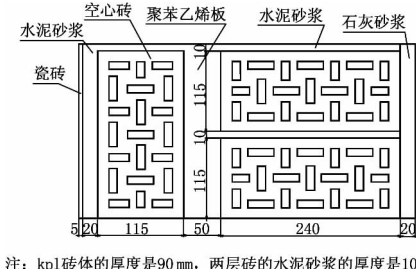
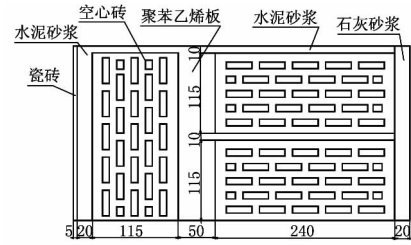


图 7 kp1-2-1 墙体结构示意图

注: kp1 砖体的厚度是 90 mm, 两层砖的水泥砂浆的厚度是 10 mm



注: kp1 砖体的厚度是 90 mm, 两层砖的水泥砂浆的厚度是 10 mm

图 8 kp1-3-1 墙体结构示意图

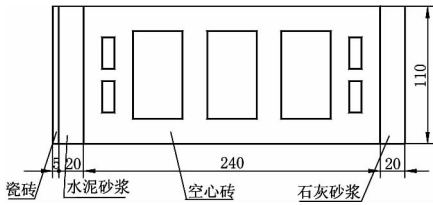


图 9 KF1 墙体结构示意图

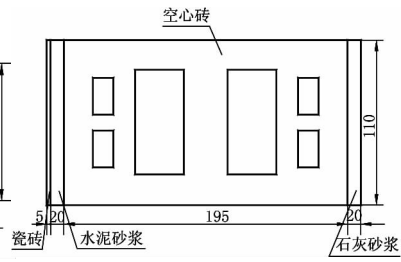


图 10 KF2 墙体结构示意图

表 1 典型的空心砖及多孔砖墙体传热谐波性能表

	1 阶谐波振幅	1 阶谐波相位	2 阶谐波振幅	2 阶谐波相位
	幅衰减度 ν_1	延迟 ϵ_1/rad	幅衰减度 ν_2	延迟 ϵ_2/rad
KF1 型空心砖墙体	18.565	2.346	50.490	3.556
KF2 型空心砖墙体	9.600	1.611	18.480	2.504
kp1-1-1 型多孔砖墙体	221.658	4.052	1219.112	5.680
kp1-2-1 型多孔砖墙体	263.425	4.227	1 527.693	5.886
kp1-2-2 型多孔砖墙体	301.243	4.345	2 026.201	5.240
kp1-3-1 型多孔砖墙体	263.134	4.209	1 527.498	5.865

多孔砖、空心砖外墙时墙体的冷负荷。

例如有一标准房间,外墙采用 kp1-1-1 型多孔砖墙体,房间的楼板、顶棚、内墙均为重型,计算出房间对外墙辐射热的 1,2 阶衰减度和相位延迟^[7]: $\mu_1=1.797, \epsilon'_1=38.68^\circ; \mu_2=2.61, \epsilon'_2=41.08^\circ$ 。

郑州西向外墙的综合温度 $t_{z,\tau}=38.14+15.59 \times \sin(15\tau+229.23)+6.793 \sin(30\tau+352.52)$

取室内温度 $t_n=26^\circ\text{C}$,当房间与邻室间传入、传出热量相等时,由式(4)得单位面积西向外墙形成的冷负荷为

$$CLQ = 6.1914 + 0.2447 \sin(15\tau - 2.91) + 0.0194 \sin(30\tau - 27.16) + 0.2043 \sin(15\tau - 41.59) + 0.0112 \sin(30\tau - 68.24)$$

计算结果用图 11 中的曲线表示。

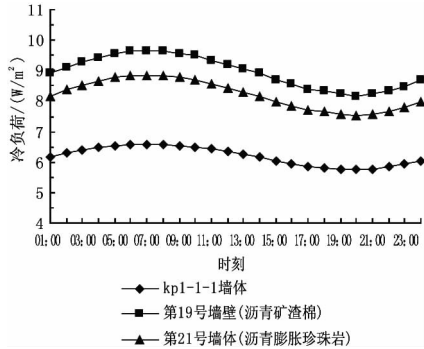


图 11 实心墙体与多孔砖墙体传热形成冷负荷对比图

图 11 中两种墙体的参数取自《全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力》,第 19 号墙体沥青矿渣棉保温层厚度 50 mm,总传热系数 $0.73 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,第 I 类墙体;第 21 号墙体沥青膨胀珍珠岩保温层厚度 60 mm,总传热系数 $0.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,第 I 类墙体;kp1-1-1 型多孔砖墙体总传热系数 $0.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

与图 11 中相同构造类型、同等砖墙厚度和相同厚度保温材料的实心墙体对比,kp1-1-1 型节能多孔砖墙体的周期性传热过程中的隔热性能有显

著提高,传热系数下降分别达 30.1% 和 23.9%。由计算得出的冷负荷数据可知,尽管多孔砖墙体存在内部孔洞使自身质量变轻,但是墙体对室外周期性温度波的延迟性能与对比墙体基本相同。

4 结论

4.1 节能多孔砖、空心砖墙体内部孔洞数量多、结构复杂,在传统谐波分析无法计算出墙体热工参数时,数值计算的方法能方便、准确地得出墙体传热各阶谐波振幅衰减度、各阶谐波延迟时间。本文得出的多种空心墙体传热谐波参数可直接用于计算各种工业、民用建筑的夏季空调冷负荷。

4.2 谐波反应法计算具有适应性强的优点,已知建筑物所在地具体朝向下墙外表面综合温度的傅里叶级数后,即可按本文中的公式计算出墙体冷负荷数值。

4.3 采用 2 阶谐波计算墙体传热量、墙体冷负荷的精度优于 1 阶谐波计算结果。

4.4 与墙体厚度相近的保温实心墙体相比,多孔砖保温墙体在周期性边界条件下的隔热性能有显著提高,在达到相同的节能效果时,保温材料厚度