

特朗伯墙式空腔建筑体系的传热模型和数值模拟

刘 义¹, 陈 星², 王新宇¹

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 将特朗伯墙应用于空腔建筑体系, 利用太阳能蓄热墙体对玻璃与墙体之间的空气夹层进行加热, 热气流上升通过空心楼板, 对上层房间进行采暖。建立了此类建筑的传热模型, 并对此类建筑进行了数值模拟分析, 分析结果表明: 空气夹层内热气流分布情况对房间的加热效果和室内的温度分布起到至关重要的影响, 较之连通型特朗伯墙式空腔建筑体系, 分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系气流组织更合理, 对建筑体系加热更均衡, 因而对楼层较高的建筑具有更好的适用性。

关键词: 特朗伯墙; 空腔建筑; 地板采暖; 太阳能; 传热

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0890-05

Heat transfer model and mathematics simulation of Trombe Wall to cavity construction system

LIU Yi¹, CHEN Xing², WANG Xinyu¹

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225127, China;

2. Collegel of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225127, China)

Abstract: Trombe wall is applied in cavity construction system to heat the air in the gap between the glass and the solar thermal storage wall. The updraft in the gap is led to pass through hollow floor and to supply heat to upper room. Heat transfer model is built and numerical simulation of this kind of buildings is done. The results show that the distribution of thermal airflow in air gaps plays a decisive role in heating effect and indoor temperature distribution. In comparison with the cavity construction system with connected trombe walls, the cavity construction system with disconnected trombe walls has an appropriate airflow distribution and a uniform heating effect, which has better serviceability for high-rise buildings.

Key words: Trombe Wall; cavity construction; floorheating; solar energy; heat transfer

空腔建筑是一种特殊的建筑型式, 采用空腔楼板、空腔砌体、空腔屋面等, 将建筑进行空心化, 从而达到节约建筑材料, 降低建筑成本的目的。常见的现浇空心楼板透视图和横剖面图见图 1 和图 2。目前对空腔建筑的研究领域多集中于墙体材料、结构耐久性、维护加固等方面, 其主要目的大多是为了实现其基本的建筑功能, 而对这类建筑赋予更广泛的功能, 例如通风功能、传热功能、管线功能、安全功能等, 则是一个较新的研究课题。为了满足人在建筑内居住的舒适性, 对空腔建筑室内热环境的研究, 将是空腔建筑研究范畴内的核心内容。

Maerefa^[1] 等人对采用太阳能烟囱和蒸发冷却通道的独体别墅进行了自然冷却方面的研究; Lee^[2] 等人对通风屋顶通道中的气流进行了实验研究; Abdullatif^[3] 等人对夏季重质屋顶通道中的自

然对流共轭效应进行了研究; Briga^[4]、Ma^[5] 和 Shi^[6] 等人则对太阳能特朗伯墙(Trombe Wall)的性能展开了一定研究。

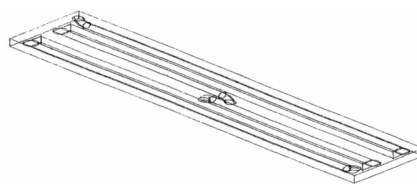


图 1 现浇空心楼板透视图

Fig. 1 Perspective view of on-sit concrete hollow floor

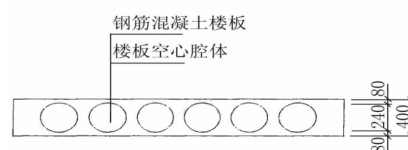


图 2 现浇空心楼板横剖面图

Fig. 2 Sectional view of on-sit concrete hollow floor

收稿日期: 2018-03-14

修改稿日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508494); 住房和城乡建设部研究开发项目(2014-k2-022)

第一作者: 刘 义(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑热环境方面研究. E-mail: liuyi@yzu.edu.cn

由于空腔建筑体系具有丰富的空心结构,若能在满足建筑结构要求的前提下,将空心结构彼此连通,组织空气在建筑物内部的空腔体系中合理的流动,并通过墙体、楼板、门窗等结构对室内进行通风和换热,使之实现舒适性和建筑节能的目标,这将作为一种较新的建筑设计构想^[7-12].

将太阳能特朗伯墙(Trombe Wall)应用于空腔建筑体系,建立了特朗伯墙式空腔建筑体系热量传递的数学模型,对建筑采暖过程进行数值模拟和分析,从而提出一种关于低碳节能建筑的设计方法.

1 特朗伯墙式空腔建筑体系工作原理

以一幢三层建筑为例,建筑物南面设置蓄热墙体,涂以黑色选择性吸收材料涂层,在离墙外表面 10 cm 左右安装高透光玻璃幕墙,玻璃幕墙与南墙之间形成竖直空气夹层.将空气夹层与现浇空心楼板连通,并由空心楼板进一步与其他空心墙体连通,形成建筑物内部空气流通网络.空气流通网络中,如果涉及到跨越水平或竖直防火分区的情况,需采取相应的防火隔离措施,在灾情发生时将空气通道隔断.

根据竖直空气夹层是否贯通整个楼层,又可将特朗伯墙式空腔建筑体系分为以下两种情况.

1.1 连通型特朗伯墙式空腔建筑体系

若将竖直空气夹层贯通整个楼层,则应在玻璃幕墙底部和顶部开设通风孔,并在建筑物底层蓄热墙和北墙下部各开设通风孔,从而形成连通型特朗伯墙式空腔建筑体系,见图 3.

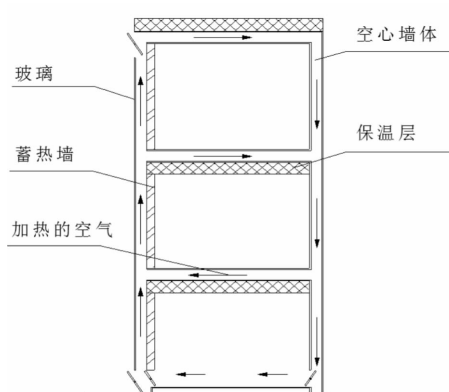


图3 连通型特朗伯墙式空腔建筑体系示意图

Fig. 3 Cavity construction system with connected trombe walls

采暖季节时,玻璃幕墙上下两个通风口关闭,底层墙体下部通风口开启,由于蓄热墙体吸收太阳能而具有较高温度,可对竖直夹层内的空气进行加热,在热压作用下,底层房间室内空气由底部通风口进入竖直夹层,竖直夹层热气流上升,并通过空心楼板水平夹层,楼板夹层中热空气携带的热量以导热方式穿透楼板向上传递至上层房间,对房间进行采暖.放热后的空气在其他空心墙体中沉降,最后由底部房间通风口进入室内,从而完成整栋楼的自然对流.

由于传统的特朗伯墙式建筑均采用热空气上部侧送方式,而此种建筑形式采用地板采暖方式,热气流在上升过程中对室内空气进行逐层置换,符合人体冷热感觉的规律,而且具有较高的换气效率和能量利用效率.

非采暖季节时,可将玻璃幕墙顶部通风口开启,底部通风口关闭,蓄热墙体吸收太阳能加热竖直夹层中的空气,并依靠建筑物门窗的开启产生热压,则可实现建筑的通风功能.

1.2 分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系

若将竖直空气夹层在每层楼板处隔开,则应在每层玻璃幕墙底部和顶部均开设通风孔,每层蓄热墙和北墙下部均开设通风孔,从而形成分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系,见图 4,其工作原理与连通型特朗伯墙式空腔建筑体系基本相同,但由于垂直楼层间的空气并不连通,所以某楼层特朗伯墙墙体内部的热空气只能流到本楼层顶部楼板与上方楼层底部地板之间的空心夹层中,而并不能流到上方楼层的特朗伯墙墙体内部.

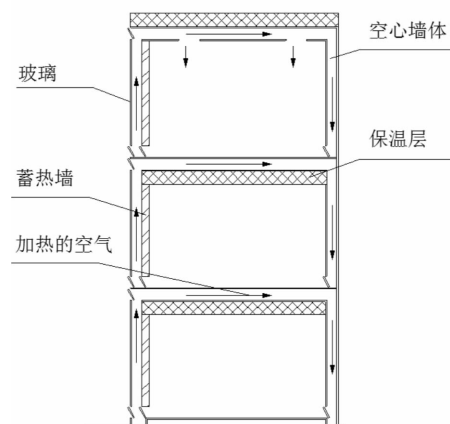


图4 分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系示意图

Fig. 4 Cavity construction system with disconnected trombe walls

2 特朗伯墙式空腔建筑体系传热模型

将竖直和水平空气夹层中的传热近似为一维稳态导热过程,忽略玻璃盖板、集热墙和地板的热容量,并将楼板视作绝热边界,可建立特朗伯墙式空腔建筑体系热量传递的数学模型。

2.1 竖直空气夹层传热的数学描述

玻璃盖板热平衡方程为

$$S_g = (h_{out} + h_{sky})(T_g - T_{out}) + h_g(T_g - T_a) + h_{gw}(T_g - T_w) \quad (1)$$

式中: S_g 为玻璃盖板吸收的太阳辐射热 (W/m^2), $S_g = \alpha_g I_c$, 其中 α_g 为玻璃对太阳辐射的吸收率, I_c 为太阳辐射强度; h_{out} 为玻璃盖板与外界空气的对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); h_{sky} 为玻璃盖板向天空的辐射换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); h_g 为玻璃盖板与夹层空气间的对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); h_{gw} 为玻璃盖板与集热墙外表面之间的辐射换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); T_{out} 、 T_g 、 T_a 、 T_w 分别为室外空气、玻璃盖板、空气夹层和集热墙外表面的温度 (K)。

集热墙热平衡方程为

$$S_w = h_w(T_w - T_a) + h_{gw}(T_w - T_g) + k_{wi}(T_w - T_i) \quad (2)$$

式中: S_w 为集热墙吸收的太阳辐射热 (W/m^2), $S_w = \rho_g \alpha_w I_c$, 其中 ρ_g 为玻璃对太阳辐射的穿透率, α_w 为集热墙对太阳辐射的吸收率; h_w 为集热墙与夹层空气间的对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); k_{wi} 为集热墙与室内空气的传热系数 ($W/m^2 \cdot K$); T_i 为室内空气温度 (K)。

竖直夹层空气热平衡方程为

$$q_1 = h_g(T_g - T_a) + h_w(T_w - T_a) \quad (3)$$

式中: q_1 为单位面积竖直夹层空气的吸热量 ($W/m^2 \cdot K$)。

2.2 水平空气夹层传热的数学描述

地板热平衡方程为

$$h_{fl}(T_a - T_{fl}) = k_{fi}(T_{fl} - T_i) \quad (4)$$

式中: h_{fl} 为地板与夹层空气间的对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$); k_{fi} 为地板与室内空气的传热系数 ($W/m^2 \cdot K$); T_{fl} 为地板的温度 (K)。

水平夹层空气热平衡方程为

$$q_2 = h_{fl}(T_a - T_{fl}) \quad (5)$$

式中: q_2 为单位面积水平夹层空气的散热量 ($W/m^2 \cdot K$)。

2.3 房间空气传热的数学描述

房间空气的热平衡方程为:

$$k_{wi}(T_w - T_i)A_w + k_{fi}(T_{fl} - T_i)A_{fl} + Q_{source} = Q_{loss} \quad (6)$$

式中: A_w 为集热墙面积 (m^2); A_{fl} 为地板面积 (m^2); Q_{source} 为室内人体、设备、照明等热源的对流散热量 (W/m^2); Q_{loss} 为房间空气的失热量, 包括空气向围护结构的散热量、冷风渗透和门窗开启的失热量。

2.4 空气夹层中总热平衡方程

$$MC_p(T_a - T_{out}) = q_1 A_w - q_2 A_{fl} \quad (7)$$

式中: M 为空气夹层中空气质量流量 (kg/s); C_p 为空气定压比热 ($J/kg \cdot K$)。

式(1)~(7)构成了特朗伯墙式空腔建筑体系传热完整的数学模型, 其中包含了连通型和分隔型两种情况, 各个换热系数均可通过各自的准则方程求出, 方程组中有 T_g 、 T_a 、 T_w 、 T_{fl} 、 T_i 、 q_1 和 q_2 共 7 个未知数, 与方程个数对应, 理论上可求出唯一解, 可通过解析法或计算机方法对其进行求解。

3 特朗伯墙式空腔建筑体系数值模拟

3.1 数值模拟模型及模拟结果

针对我国长江中下游冬冷夏热地区, 选取南京地区冬季典型工况下的气象参数, 考虑太阳辐射因素, 对两种特朗伯墙式空腔建筑进行了数值模拟^[13-14], 建筑型式见图 3 和图 4, 建筑各层层高均为 2.8 m, 各层建筑单元面积均为 3 m × 4 m, 墙体、楼板和屋顶厚度均为 24 cm, 水平和竖直空气夹层的厚度均为 10 cm, 特朗伯墙表面涂层的太阳辐射全波长吸收率为 0.92, 墙体敷设保温层, 传热系数为 1.08 $W/m^2 \cdot K$, 玻璃幕墙的太阳辐射全波长穿透率为 0.80, 其他内墙传热系数为 2.40 $W/m^2 \cdot K$ 。由于该数值模拟主要用于两种情况的对比分析, 所以模型中主要考虑各种空腔结构, 而在建筑设计、室内布置、热源设置等其他方面尽量予以简化。

采用 Fluent 6.0 软件进行数值模拟, 模拟中空气流动计算采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型, 假定室内气流为常物性不可压缩牛顿流体, Boussinesq 假设成立, 在空气夹层中采用网格局部加密。

建筑纵剖面温度云图分别见图 5 和图 6, 气流

分布图分别见图 7 和图 8。

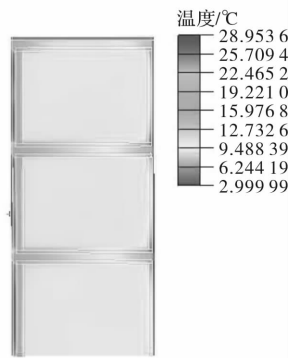


图 5 连通型特朗伯墙式空腔建筑温度云图

Fig. 5 Temperature nephogram of cavity construction system with connected trombe walls

3.2 结果分析

从图 5 和图 6 可以看出, 受到太阳辐射和特朗伯墙墙体蓄热的影响, 无论是连通型还是分隔型, 特朗伯墙垂直夹层内的空气温度均明显高于其他空心墙体中的空气温度, 在空心楼板水平夹层内, 空气温度由外向内均是逐渐降低, 而在相同水平长度内, 连通型特朗伯墙式空腔建筑中的温度衰减量更大。

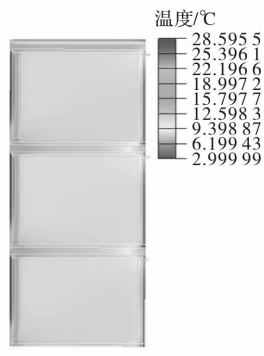


图 6 分隔型特朗伯墙式空腔建筑温度云图

Fig. 6 Temperature nephogram of cavity construction system with disconnected trombe walls

从这两张云图中还可看出, 分隔型特朗伯墙式空腔建筑中的空气平均温度高于连通型特朗伯墙式空腔建筑中的空气平均温度, 根据软件统计数据, 前者的室内空气平均温度为 11.6°C , 而后的室内空气平均温度为 12.9°C 。这说明在冬季太阳辐射的情况下, 分隔型特朗伯墙式空腔建筑的加热效果较好。

从图 7 和图 8 可以看出, 在太阳辐射和自然对流的作用下, 无论是连通型还是分隔型, 特朗伯墙水平夹层内的空气均向上浮升, 上升到该楼层

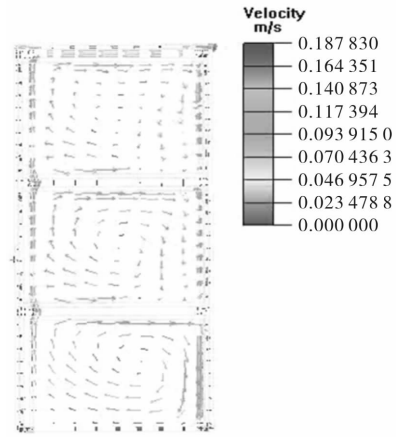


图 7 连通型特朗伯墙式空腔建筑气流分布图

Fig. 7 Air current diagram of cavity construction system with connected trombe walls

顶部后, 继续沿着空心楼板内的水平夹层由外向内流动, 这种热气流将会对上方的地板进行加热, 以类似于地板辐射采暖的方式, 在各层房间内形成一个比较良好的气流组织形式, 并对整个上层房间进行热量的供应。

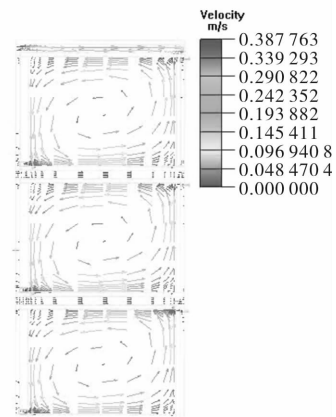


图 8 分隔型特朗伯墙式空腔建筑气流分布图

Fig. 8 Air current diagram of cavity construction system with disconnected trombe walls

从这两张气流分布图上还可以看出, 对于连通型特朗伯墙式空腔建筑, 以建筑中和面为界限, 水平空气夹层内气流分布分为两个反向流动的区域。而对于分隔型特朗伯墙式空腔建筑, 各层气流分布较为均匀, 并未存在反向流动区, 因而水平空气夹层中热空气对上层房间的加热作用具有较强的一致性。这是因为在连通型特朗伯墙式空腔建筑竖向狭长的空气通道中, 上升热气流产生相互干扰, 对热气流向水平夹层中的流动形成阻碍。

从以上分析可以看出, 分隔型特朗伯墙式空

腔建筑对于各层房间的加热效果更好,气流也更均匀,因而具有相对更良好的推广价值。尤其对于楼层较高的建筑,由于连通型特朗伯墙式空腔建筑垂直夹层内热气流的相互干扰作用更强,所以分隔型特朗伯墙式空腔建筑应具有更好的适用性。

4 结论

(1)提出特朗伯墙式空腔建筑体系,采用太阳能蓄热墙加热空气,通过空心楼板向上层房间进行供热。

(2)建立了特朗伯墙式空腔建筑体系传热的数学模型。

(3)数值模拟结果表明,竖直和水平空气夹层内热气流分布情况对房间的加热效果和室内的温度分布起到至关重要的影响。

(4)分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系较之连通型特朗伯墙式空腔建筑体系,加热效果更好,气流组织更合理,对于本模型,室内平均温度提升约1.3℃,尤其对楼层较高的建筑,分隔型特朗伯墙式空腔建筑体系具有更好的适用性。

参考文献 References

- [1] MAEREFAT M, HAGHIGHI A P. Nature cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity [J]. *Renewable Energy*. 2010, 22 (1): 1-13.
- [2] LEE S, SANG H P, YEO M S, et al. An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof [J]. *Building and Environment*. 2009, 44 (7): 1431-1439.
- [3] ABDULLATIF B N, MAHMOUD M A. Conjugate natural convection in the roof cavity of heavy construction building during summer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27 (1):287-298.
- [4] BRIGA S, ANA C, MARTINS A, et al. An analytical approach to assess the influence of the massive wall material, thickness and ventilation system on the Trombe wall thermal performance[J]. *Journal of Building Physics*, 2018,41(5):445-468.
- [5] MA Q S, FUKUDA H, KOBATAKE T, et al. Study of a double-layer trombe wall assisted by a temperature-controlled DC fan for heating seasons[J]. *Sustainability*, 2017, 9 (12):2179.
- [6] SHI T, LI S S, ZHANG H. Preparation of palygorskite-based phase change composites for thermal energy storage and their applications in trombe walls [J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition)*, 2017, 32(6):1306-1317.
- [7] SUSANTI L, HOMMA H, MATSUMOTO H. A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building [J]. *Energy and Buildings*. 2011, 43 (1):211-218.
- [8] CERNE B, MEDVED S. The dynamic thermal characteristics of lightweight building elements with a forced ventilated cavity and radiation barriers[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(9):972-981.
- [9] BIANCO V, DIANA A, MANCA O, et al. Thermal behavior evaluation of ventilated roof under summer and winter conditions[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2017, 35:353-360.
- [10] DAI Y J, SUMATHY K, WANG R Z, et al. Enhancement of natural ventilation in a solar house with asolar chimney and a solid adsorption cooling cavity [J]. *Solar Energy*, 2003,74(1):65-75.
- [11] ZHOU J, CHEN Y M. A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010,14(3):1321-1328.
- [12] SUSANTI L, HOMMA H, H MATSUMOTO H. A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain[J]. *Energy and Buildings*. 2008, 40(6):2196-2206.
- [13] MANZ H, FRANK T. Thermal simulation of buildings with double-skin facades[J]. *Energy and Buildings*. 2005, 37(3):1114-1121.
- [14] EVOLA G, MARLETTA L, SICURELLA F. Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings [J]. *Energy and Buildings*. 2014, 70: 480-489.

(编辑 吴海西)