

一种新型蒸发冷却式通风外墙的热工性能研究

徐 鹏¹, 赵嘉靖², 李俊明²

(1. 北京建筑工程学院建筑热能工程系, 北京 100044; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘 要:分析了复合墙体内部空气与水两种流体域的流动传热状况,借助于 Fluent 软件,分别研究了自然通风与机械通风状态下该模块墙体的热工性能.结果表明:与常规的建筑墙体相比,利用水的蒸发冷却对外墙内表面进行降温的复合通风外墙结构具有很好的隔热效果.蒸发冷却式通风外墙只能采用水层位于通风空气层内侧的结构形式.通过提高空气入口速度,可以达到更好的隔热效果.而通风机的安装位置和送风方向的选择相对自由.水层厚度与空气层厚度对墙体稳态热工性能的影响很小.

关键词:通风外墙;蒸发冷却;建筑节能;自然通风;机械通风

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)04-0546-05

0 引 言

通风夹壁墙是我国南方地区传统采用的夏季隔热措施.在普通外墙的基础上增加一个通风间层,即可以实现对外墙内表面降温 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的效果^[1].如何充分利用自然条件,进一步提高隔热效果是实现建筑绿色节能不断追求的目标.“特隆布”墙是结合太阳能利用与墙体蓄热的典型通风外墙结构.但研究^[2-3]表明,该种形式的通风外墙结构并不适合我国南方地区的气候条件.

在传统的普通外墙加通风间层结构的基础上应用蒸发冷却原理,笔者提出一种模块化复合通风外墙结构^[4-9],利用水的蒸发实现夏季对建筑维护结构的冷却,可以进一步增强自然隔热降温的效果.与目前常规建筑墙体的隔热性能相比,该复合墙体表现出了巨大的优势.

通过对墙体内部空气与水两种流体域的流动传热状况分析,建立了合适的数理模型^[10].通过对该新型通风外墙的热工性能进行数值模拟研究,明确了该类墙体的结构特征,并优化了墙体结构.

1 墙体的物理模型

该复合墙体由空气层与水层两部分组成,结构如图 1 所示.墙体的中间一层采用渗水多孔陶瓷板,最里面一层由防潮板构成,最外层可以装配 PV 光电转化单元增强太阳辐射的吸收和利用.可以用多块模块化墙体组成一建筑外墙,对于同一外墙的所有模块可以共用一个水箱供水.

根据水层与空气层相对位置的不同,可分为水层在外和水层在内的两种方案.按照通风方式的不同,可以分为自然通风与机械通风两种类型;根据机械送风的方向又可分为上送风和下送风两种方案.

物理模型尺寸如下:PV 板厚度 $d_1=0.01\text{ m}$,多孔陶瓷板厚度 $d_2=0.02\text{ m}$,内侧墙体厚度 $d_3=0.06\text{ m}$,水层厚度 $D_{\text{water}}=0.01\sim 0.12\text{ m}$,空气层厚度 $D_{\text{air}}=0.01\sim 0.12\text{ m}$,模块墙体高度 $H=0.5\text{ m}$.

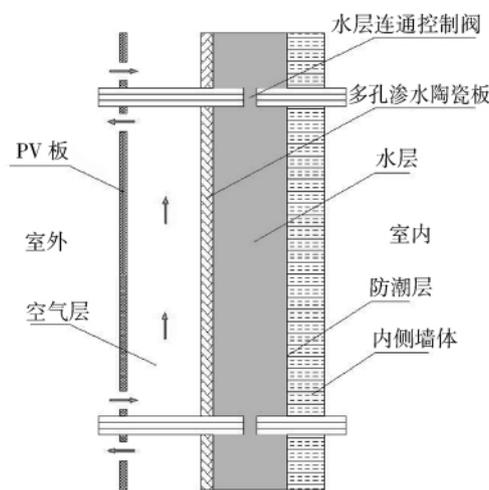


图 1 复合墙体结构

Fig. 1 Structure of the sandwich wall

*收稿日期:2010-11-18 修改稿日期:2011-07-27

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点课题资助项目(2006BAJ01B03-03);北京市“供热、供燃气、通风及空调工程”重点实验室开放课题资助项目(KF201010)

作者简介:徐 鹏(1976-),男,山东济南人,硕士,讲师,主要从事建筑能源高效利用及建筑节能研究.

通过数值模拟分析,通风间层的气流方向对墙体热工性能影响很小,可以忽略不计.本文仅对自然通风和机械通风下水层与空气层相对位置变化的方案(如图 2 所示)的研究成果进行介绍.

2 数理模型与计算设置

为建立能正确反映传热规律的简化数理模型,对复合墙体传热过程作如下主要假设^[11-12]:(1)认为各层壁面上下绝热,传热只发生于垂直面;(2)水层左右壁面温差很小,忽略水层内的辐射换热,只考虑空气夹层内的辐射换热;(3)多孔陶瓷板与空气接触的壁面充分润湿,但不形成水膜,在该壁面上不考虑两相流问题;(4)外墙面不透明,来自室外的辐射热源完全作用在外墙面上.

本研究只关心物理量的平均效应,并不需要得到瞬态湍流场的全部信息,因此在求解湍流场时采用 Reynolds 时均方程模拟方法.对于水层与空气层两个流体区域的流动传热问题,在 Boussinesq 近似的基础上,采用 RNG $k-\epsilon$ 模型求解空气域,采用 SST $k-\omega$ 低雷诺数模型求解水域.与已有实验结果进行了对比验证^[13-15],认为该模型是合理、可行的.近壁面区域采用 Fluent 软件提供的近壁模型方法.辐射换热采用离散坐标(DO)辐射模型.收敛判据为能量平衡残差小于 $1E-10$,连续性方程残差小于 $1E-5$,水蒸气浓度平衡残差小于 $1E-6$.并确认内墙外壁面的平均温度波动小于 $0.01K$.

固定不变的边界条件有:室外空气边界压力 $P_0 = 101\ 325\ Pa$;机械通风的空气层入口流速 $u = 2\ m/s$;外墙面混合边界条件——对流换热系数 $h_1 = 20\ W/(m^2 \cdot K)$;内侧墙体壁面混合边界条件 $h_2 = 7.5\ W/(m^2 \cdot K)$; $T_{\infty, indoor} = 298K$;墙体的内部壁面辐射发射率等于 1;其余壁面均设为绝热壁面.

通过对复合墙体传热过程的分析^[13],对比不同的室外环境参数(太阳辐射强度、空气干球温度、空气湿度)和墙体内部流动状态(墙体各夹层厚度与高度、空气夹层流速)下复合墙体的热流密度,评价复合墙体分别在自然通风和机械通风下的热工性能.

3 自然通风条件下墙体的热工性能

图 3 为水层位于外侧的方案 1 墙体,在室外综合辐射强度 $100\ W/m^2$ 和 $200\ W/m^2$ 工况下空气层

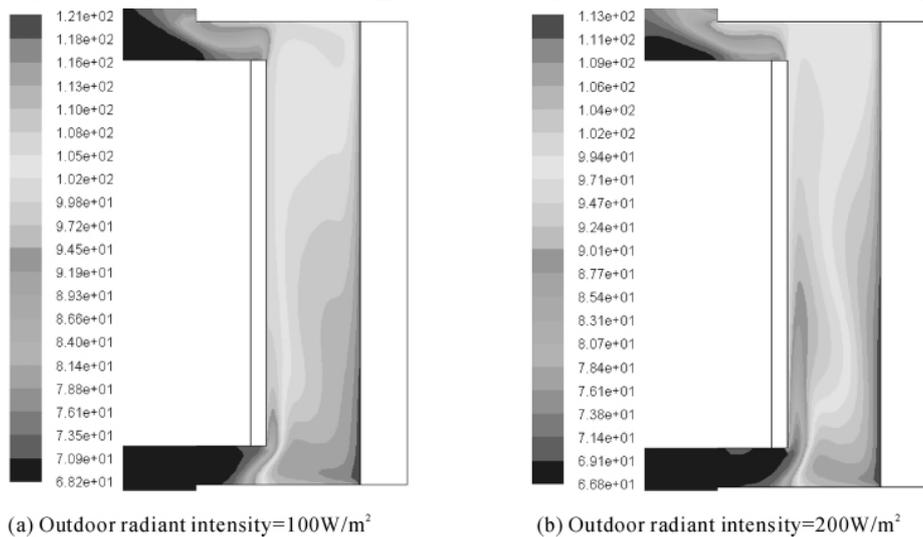


图 3 低室外辐射强度下,方案 1 墙体的空气层相对湿度分布

Fig. 3 Relative humidity distribution of air layer in model 1

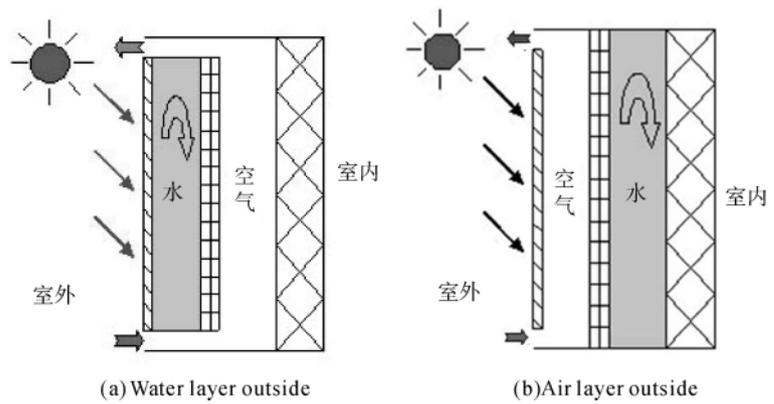


图 2 模块墙体的两种结构方案

Fig. 2 Two models of the sandwich wall

的相对湿度分布.

当室外综合辐射强度较低时,湿空气沿陶瓷板壁面上升,至顶面后有部分热湿空气被分流到内侧墙体外壁面,并且沿此壁面冷却下沉.由图 3 可见,在内侧墙体外壁面附近大部分区域的相对湿度已经超过 100%.当然,这种现象在现实中是不可能出现的.之所以得到这样的结果是由于计算模型中没有加入冷凝现象的数学模型.但还是可以确定方案 1 墙体在低辐射强度的工况下,热湿空气会在内侧墙体外壁面发生冷凝现象.

从整个墙体传热的角度看,内侧墙体外壁面的水蒸气冷凝会加强墙体的导热性能.因此,水层位于外侧的方案 1 的墙体结构是不可取的.

通过模拟发现,对于大多数工况,入口空气上行至陶瓷板外壁面高约 0.05 m 的位置即分成两部分,主流继续沿壁面向上移动,直到遇到来自出口处的部分回流时停止向上移动,与出口回流汇合后延垂直陶瓷板外壁面的方向流动.这两股相向流动的空气流在它们相遇的地方形成一个“死区”,如图 4 所示.在这个区域里空气流速很低,空气中水蒸气质量分数很高,温度很高.随着室外辐射强度的增强,陶瓷板外壁面近壁区流速增大,从而推动该死区位置不断向上移动.死区的存在抑制了空气层内的流动,降低了陶瓷板外壁面与空气的热质交换能力.

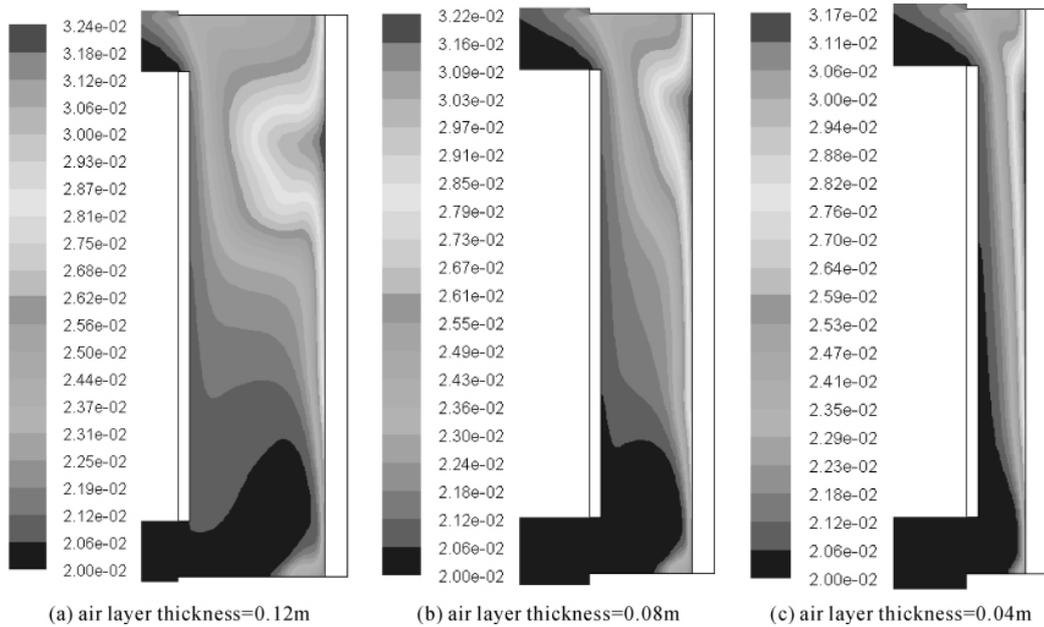


图 4 空气层厚度对空气湿度分布的影响

Fig. 4 The impact of air layer thickness on relative humidity distribution

图 4 所示为采用不同空气层厚度时,方案 2 墙体空气层内的相对湿度分布.图 5 所示为方案 2 采用不同空气层厚度时,内侧墙体热流密度的模拟结果.当空气层厚度在 0.02 m 左右时,内侧墙体热流密度最小.随着空气层厚度减小,空气层内气体平均密度变小,因而产生更大的热压作用,使得空气层内流速增大.随着空气层厚度变薄,空气流速增加,空气层中高温高湿的“死区”位置不断上移,直至在空气层厚度 0.02 m 左右时基本消失.可见,当其他结构参数不变时,存在一个最优的空气层厚度,在这种工况下既没有由于空气层过厚造成的“死区”的影响,也不至于使空气夹层的湿球温度很高,从而可以使这种被动式墙体达到最优的隔热效果.

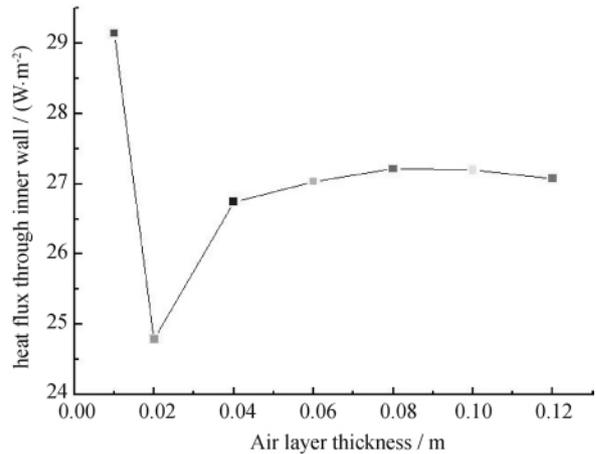


图 5 空气层厚度对墙体热工性能的影响

Fig. 5 The impact of air layer thickness on heat flux

在标准工况下(外墙室外综合辐射强度 400 W/m^2 , 空气干球温度 305K , 水蒸气质量分数 0.02), 计算出内侧墙体的热流密度为 24.7 W/m^2 , 外墙外壁面与内侧墙体外壁面温差 15°C , 内侧墙体外壁面温度 30°C . 墙体的当量导热系数约为 $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. 可见, 这种墙体在高辐射强度下的隔热性能非常优异.

4 机械通风条件下墙体的热工性能

图6为机械通风条件下, 空气入口速度对内墙热流密度的影响. 可见, 方案1的内侧墙体热流密度随入口风速的增大而增大, 失去了通过机械通风提高隔热性能的意义. 而水层位于内侧的方案2墙体, 则随空气流速增大, 表现出最佳的隔热性能.

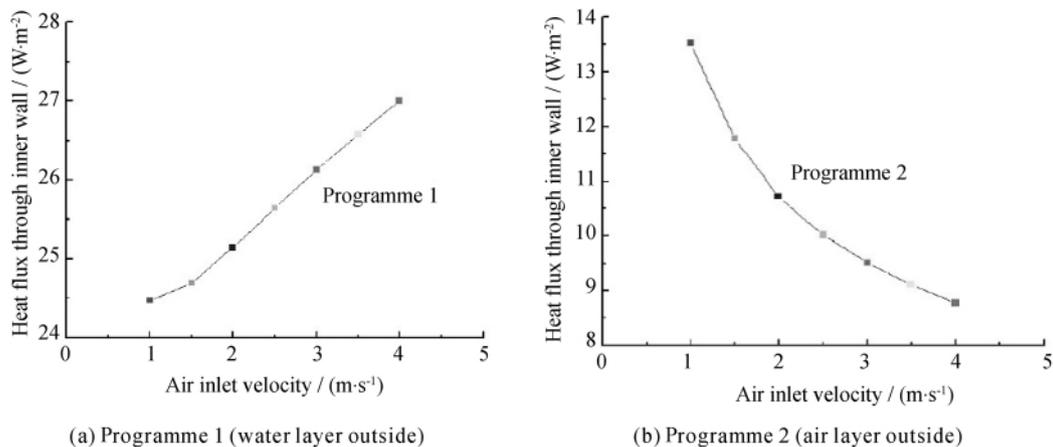


图6 空气入口流速对内墙热流密度的影响

Fig. 6 The impact of air inlet velocity on heat flux

通过模拟还可发现, 机械通风条件下, 水层厚度大于 1 cm 及空气层厚度大于 2 cm 时, 对墙体稳态热工性能的影响很小. 因此, 水层厚度可以控制在 1 cm 左右, 空气层厚度可以控制在 2 cm 左右以节省建筑空间. 空气层入口风速对机械通风复合墙体的传热性能影响很大. 而空气层气流方向对墙体综合传热性能影响很小, 通风机的安装位置和送风方向的选择相对自由.

5 结论

综合不同通风形式下对不同结构蒸发冷却式模块墙体的热工性能研究, 得到以下结论:

(1) 利用水的蒸发冷却对外墙内表面进行降温的复合通风外墙结构具有很好的隔热效果, 无论是采取自然通风还是机械通风的方式, 与目前常规的建筑墙体相比, 均表现出了巨大的性能优势.

(2) 水层位于复合墙外侧的结构, 无论何种通风方式都不能发挥很好的隔热效果, 是不可取的结构形式. 蒸发冷却式通风外墙只能采用水层位于通风空气层内侧的结构形式.

(3) 空气层入口风速对通风复合墙体的传热性能影响很大. 随空气流速增大, 水层位于内侧的复合墙体表现出最佳的隔热性能. 机械通风的方式能达到更好的隔热效果. 空气层气流方向对墙体综合传热性能影响很小, 通风机的安装位置和送风方向的选择相对自由.

(4) 在本文研究的墙体尺寸下, 水层厚度大于 1 cm 及空气层厚度大于 2 cm 时, 对墙体稳态热工性能的影响很小. 因此, 水层厚度可以控制在 1 cm 左右, 空气层厚度可以控制在 2 cm 左右以节省建筑空间.

参考文献 References

- [1] 本书编委会. 建筑工程节能设计手册[M]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Editorial board. Design Manual of Building Energy Efficiency[M]. Beijing: China Planning Press. 2007.
- [2] Commonwealth of Australia. Thermal mass[]. PASSIVE DESIGN. www.greenhouse.gov.au.
- [3] TORCELLINI P, PLESS S. Trombe walls in low-energy buildings: Practical experiences[C]// The World Renewable Energy Congress VIII and Expo. Denver, Colorado. August 29-September 3, 2004.
- [4] 杨红, 冯雅, 陈启高. 夏热冬冷气候条件下低能耗建筑设计[J]. 新建筑, 2000(3): 11-13.

- YANG Hong, FENG Ya, CHEN Qi-gao. Design of low energy-exhaustion building in hot summer and cold winter region of China[J]. *New Architecture*, 2000(3):11-13.
- [5] 吴彻平. 居住建筑围护结构节能分析与工程实践[D]. 重庆:重庆大学,2005.
WU Che-ping. Analyze and practice of resident building envelope energy efficiency[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [6] NAGANUMA H. A study on the cooling effect by water film formation on an exterior surface coated with a super-hydrophilic photocatalyst [C]//The 2005 World Sustainable Building Conference. Tokyo: 2005.
- [7] GAN G, RIFFAT S B. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998(18): 1171-1187.
- [8] RIFFAT S B, MA X. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems[J]. *International Journal of Energy Research*, 2004, 28:753-768.
- [9] DESSEL V, MESSAC S, KHIRE R. Active building envelopes: A preliminary analysis[A]//Asia International Renewable Energy Conference. Beijing:2004.
- [10] 牛润萍. 用于供冷的闭式冷却塔换热模型与性能分析[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*,2007(3):453-456.
NIU Run-ping. Modeling and performance analysis of the closed cooling tower[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*,2007(3): 453-456.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2004.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [12] 连之伟. 热质交换原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:18.
LIAN Zhi-wei. Principles of heat and mass transfer[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005:18.
- [13] 赵嘉靖. 一种新型模块式墙体热工性能的研究[D]. 北京:清华大学,2007.
ZHAO Jia-jing. Investigation on the thermal characteristics of a novel module wall facade system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [14] Chen Q. Comparison of different $k-\omega$ models for indoor air flow computations[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1995(28): 353-369.
- [15] OZOE H, MOURI A, OHMURO M, et al. Numerical calculation of laminar and turbulent natural convection in water in rectangular channels heated and cooled isothermally on the opposing vertical walls[J]. *Heat Mass Transfer*, 1985(28): 125-138.

Thermal performance study on a new modular evaporative cooling ventilated wall

XU Peng¹, ZHAO Jia-jing², LI Jun-ming²

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new modular evaporative cooling ventilated wall was presented. The thermal performance of the wall was studied under natural ventilation and mechanical ventilation condition. The results show that: the evaporative cooling ventilated wall with reasonable structure shows obvious advantage in heat-insulating performance. Only the wall structure of air layer outside water layer is reasonable. And with the increase of air inlet velocity, it shows better heat-insulating performance. The direction of inlet airflow shows only weak effect on thermal performance, so the location of the fan or the tuyere is relatively free. The water layer thickness and the air layer thickness show little effect on steady thermal performance.

Key words: *Ventilated wall; evaporative cooling; building energy efficiency; natural ventilation; mechanical ventilation*

*Biography: XU Peng, Lecturer, Beijing, 100084, P. R. China, Tel: 0086-10-68322535, E-mail: xupeng@bucea.edu.cn