

# 主动通风式高效保温隔热外墙的传热模拟研究

刘 琳<sup>1</sup>, 余 庄<sup>1</sup>, 张 辉<sup>1</sup>, 王 薇<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 湖北 武汉 430074; 2. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 采用 CFD 模拟方法, 分析夏季工况下对室内排风进行再利用的主动通风式高效保温隔热外墙的传热过程, 并对墙体内部空气间层的速度与温度分布展开讨论。比较研究了不同空气间层通风量与外墙面温度对墙体隔热性能的影响。结果表明: 该墙体具有很好的隔热特性, 运行过程中能通过流动空气层带走 90% 以上的传入热量; 同时空气间层能有效降低内侧墙体温度, 利于减小室内墙面热辐射, 改善室内舒适度; 增大墙体通风量能显著提高墙体热阻, 增强墙体隔热性能。通过拟合分析得到了空气间层平均风速与墙体热阻值的线性回归方程。

**关键词:** 通风外墙; CFD; 隔热性能; 热阻

**中图分类号:** TU111.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)02-0287-06

## The heat transfer simulation research on the forced ventilated thermal insulating wall

LIU Lin<sup>1</sup>, YU Zhuang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The heat transfer performance of a forced ventilated thermal insulating wall was simulated and analyzed in which the indoor exhaust is utilised. And air flow velocity and temperature in the cavity of the wall are discussed as well. The influence of different ventilation rate of the air cavity and different temperature of the outer wall surface on the heat insulation performance of the wall is analyzed. The results indicate that the wall show high performance in heat insulation, the flow air in cavity can take away more than 90% of the heat quantity transferred from outside under the summer working mode. Meanwhile the flow air in cavity can reduce the temperature of the inner layer of the wall effectively which can contribute to decreasing the thermal radiation of the indoor wall surface and improving the indoor thermal amenity. Thermal resistance of the wall increases with the ventilation rate, which is beneficial for improving the performance of the wall. And a linear relationship between the average velocity of the air in cavity and the thermal resistance of the wall is obtained through fitting method.

**Key words:** ventilated facades, CFD, heat insulation, thermal resistance

高效保温隔热外墙系统是当前一项运用广泛的建筑节能技术, 它是一种采用了外墙外保温并利用了饰面干挂技术的复合墙体。其主体墙体覆盖外保温层后, 面层采用干挂饰面砖, 保温层与饰面层间留有一定间隙, 在自然通风作用下可有效形成流动空气层, 构成通风外墙。该技术使墙体的隔热保温性能得到明显提升, 利于降低建筑空调负荷<sup>[1-2]</sup>。

国外研究人员对带空气间层的通风外墙已进行了一系列研究: Carla 利用数值模拟方法研究了自然通风作用下的通风外墙, 分析了室外空气综合温度、墙体高度及空气间层厚度对墙体通风量和传热量的影响<sup>[3]</sup>。Patania 对三种不同材料外饰面板的通风外墙做了数值模拟与比较研究, 提出了墙体节能率指标并以此分析了太阳辐射、室外气温及间层进风口风速对墙体节能效果的影响<sup>[4]</sup>。Alvaro 对通

风外墙及双层通风幕墙的传热模拟研究进行了综述, 对各研究中所应用的不同数值模拟方法进行了归纳总结<sup>[5]</sup>。还有诸多文章通过模拟或实验的方法对通风墙体的热性能展开了研究<sup>[6-8]</sup>。以上研究多是针对自然通风模式下的通风外墙展开, 即便是研究主动送风模式下的通风外墙, 其通风形式也是将室外空气送入墙体间层。而本文所研究的高效保温隔热外墙是对室内排风进行再利用, 通过主动方式将其送入空气间层提高墙体性能。由于室内排风与室外空气间存在明显温差, 此种应用形式对通风外墙传热性能的改善效果尚有待研究。

本文对夏季工况下该通风墙体的传热过程进行了数值模拟, 计算了不同工况下墙体传热量及热阻值。同时分析了不同空气间层通风量与外墙面温度对墙体隔热性能的影响。本文的模拟研究过程对

收稿日期: 2014-11-27

修改稿日期: 2015-04-28

基金项目: 中国可持续能源项目(G-1011-13546); 中国博士后基金项目(2013M531697); 2014 年安徽省高校优秀青年人才支持计划项目

作者简介: 刘琳(1990-), 女, 博士生, 主要研究方向为建筑可再生能源利用。E-mail: L60@hust.edu.cn

带空气间层的围护结构如:含通风流道的光伏组件、应用相变材料的通风墙体、通风状态下的特隆布墙等具有一定适用性与参考性。

## 1 主动通风式高效保温隔热外墙的传热分析

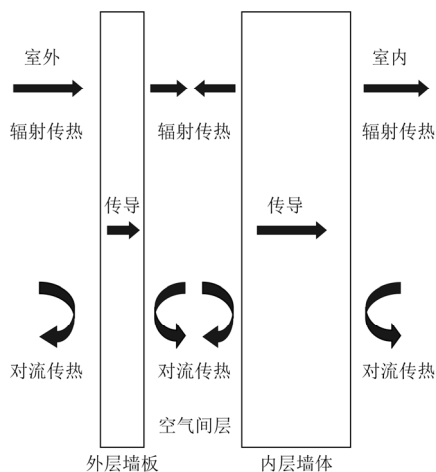


图1 通风外墙传热分析

Fig. 1 Heat transfer of ventilated facades

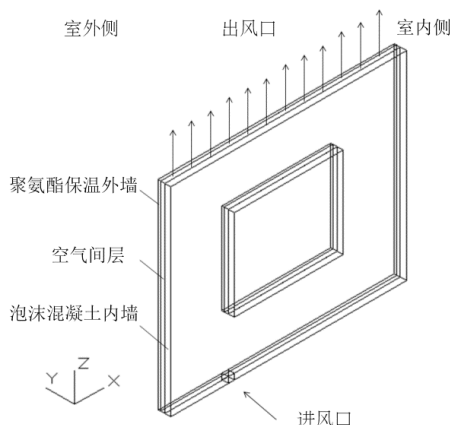


图2 主动通风式高效保温隔热外墙示意图

Fig. 2 Scheme of the forced ventilated thermal insulating wall

本文研究的主动通风式高效保温隔热外墙为夏热冬冷地区武汉市某可再生能源建筑应用示范项目的外墙系统。该通风墙体可根据季节变化,改变空气间层通风方式,并在主动送风模式下还可控制风机调节空气间层通风量。在冬夏空调季,建筑利用机械送风将室内排风送入空气间层;在过渡季利用屋顶无动力风机,抽取室内空气进入墙体间层。该通风墙体主要由三部分组成:泡沫混凝土内墙、中间空气间层及聚氨酯保温外墙,如图2所示。

通风外墙的传热过程主要由以下四部分组成:墙体内外表面与室内外环境间的对流辐射换热、内

外层墙体的内部导热、空气间层两侧墙体壁面间的辐射换热以及空气间层与两侧壁面的对流换热,传热过程如图1所示。

本文研究的是墙体经一定时间段,通风传热状态稳定后的传热过程。结合通风外墙运行的实测数据,对不同间层通风量及室外墙面温度下的墙体传热展开研究。故在CFD数值计算模型中以内外墙面温度作其边界条件,则在本文模拟计算的墙体传热过程,不包含上述室内外墙面与室内外环境间的对流辐射换热。采用温度作为模型内外墙面的边界条件使模拟计算更符合建筑实际运行状况,避免了对室内外墙面对流换热系数取经验值带来的误差。因而本文计算研究的墙体热阻为室内外墙面温差作用下的热阻,不包含室内外墙面与室内外环境间的换热热阻。对所研究的主动通风式高效保温隔热外墙,由于流动空气层的通风作用及墙体自身材料的高隔热性能,室内外墙面与环境间的换热热阻占墙体自身热阻比例极低。结合规范推荐的室内外墙面对流换热系数 $8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 、 $22.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ <sup>[9]</sup>,室内外墙面与环境间的对流换热热阻仅为墙体自身热阻的1.122%(针对表4工况1墙体热阻最小时计算得到)。故忽略室内外墙面的换热热阻来计算分析该通风墙体的热阻是合理有效的。

## 2 CFD计算模型及计算工况

### 2.1 通风外墙的CFD计算模型

如上文所述研究对象为一定时间段内通风传热稳定后的动态通墙传热过程,做以下两点基本假设:1,认为所研究问题为稳态传热问题;2,空气间层内空气为不可压缩牛顿流体。

模型采用正交六面体网格,由于空气间层厚度仅60 mm,为了更准确地模拟空气间层内的流场及温度场,湍流模型采用对黏性底层可求解的低 $R_f$ 数法 $\kappa-\varepsilon$ 模型<sup>[10]</sup>。模型网格在各壁面黏性底层及空气间层进出风口处加密。该计算模型在求解过程中耦合了导热、对流与辐射换热。辐射计算采用DO模型,在计算中将固体表面作为漫灰表面,进出风口作为黑体。在边界条件的指定中:进风口采用velocity inlet;出风口采用outflow;室内外墙面给定温度值作为其边界条件;空气间层两侧壁面为耦合壁面;其余壁面均简化为绝热壁面。经过600多次迭代后,各变量残差达到收敛控制条件。

2.2 通风外墙的物理模型及计算工况

示范建筑所应用的通风墙基本单元如图 2 所示, 模型考虑了窗户对气流的影响. 室内排风从窗户下侧进风口送入, 通过上侧出风口流出. 墙体各层材料的热物性参数如下表 1 所示.

根据示范建筑的实测数据: 在 2013 年夏季 6-8 月室内空气调节系统开启期间, 通风外墙的室内墙面温度能保持在 31℃; 8:00-18:00 时间段的室外南墙温度平均值在 35-45℃之间变化, 温度峰值出现在 56.9℃. 示范建筑通风外墙按空气间层通风量高低分两档运行模式, 其空气间层平均风速分别为 0.5m/s 和 1m/s. 为研究不同通风量和不同外墙面温度对墙体传热性能的影响, 选定五组不同通风量与外墙温度值进行模拟计算, 具体计算工况见表 2. 而通风外墙的室外壁面温度保持为 31℃.

表 1 墙体各层材料热物性参数

Tab. 1 Thermo-physical characteristics of the ventilated facade

	厚度 /mm	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	比热容 /J·kg·k <sup>-1</sup>	导热系数 /W·m·k
聚氨酯保温外墙	100	30	1 380	0.033
空气间层	60	1.255	1 006.43	0.024 2
泡沫混凝土内墙	40	700	1 050	0.078

表 2 模拟计算工况

Tab. 2 Cases of calculations

	外墙壁面温度/℃	通风量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	空气间层平均 风速/m·s <sup>-1</sup>
工况 1	45	129.6	0.25
工况 2	45	259.2	0.5
工况 3	45	388.8	0.75
工况 4	45	518.4	1
工况 5	45	648	1.25
工况 6	35	518.4	1
工况 7	40	518.4	1
工况 8	50	518.4	1
工况 9	55	518.4	1

3 模型的实验验证

本文研究的通风外墙是某可再生能源建筑应用示范项目的外墙系统, 该建筑在 2009 年完成并投入使用. 2010 年暑期对通风外墙的运行情况进行了大量实测. 实测用到的主要设备是精度为 0.3% 的康铜热电偶 6 根以及一台总线式无纸记录仪. 对建筑中的一扇通风墙体的点 1-3 及 6-8 位置钻孔后 (如下图 5 所示), 放入热电偶进行温度测量并每隔五分钟存入记录仪中.

为验证本文所建 CFD 模型的准确性, 现选取 8 月 14 日中午 14:00 时的通风外墙实测数据如表 3, 对模拟进行比较验证. 在 CFD 模型中将实测的墙体室内外壁面温度作其边界条件, 间层进风口温度设为室内空气温度, 进风风速按送风设备通风量设定. 比较实测与模拟数据, 通风墙体 6 个钻孔点内的温度对比如图 3. 从图中可以看出, 各测点的模拟与实测温度变化趋势相近, 温度值有一定偏差, 最大为 1.36℃. 引起偏差的一个重要影响因素是: 由于实测时进风口温度无法直接测量, 模拟中直接将室内温度作为墙体空气间层的进风温度, 忽视了从室内排风经过送风管送达墙体进风口的沿程温度升高. 考虑到墙体进风口风速温度无法直接测量对模型边界条件准确性造成的影响, 得到的对比验证中各点温度相近、变化趋势一致已经能说明文中 CFD 模拟的有效性.

表 3 通风外墙实测数据

Tab. 3 Experimental data on the ventilated facade

	室外墙面温 度/℃	室内墙面 温度/℃	室内空气温 度/℃	空气间层通 风量 m <sup>3</sup> /h
实测数据	44.8	32.2	32	520

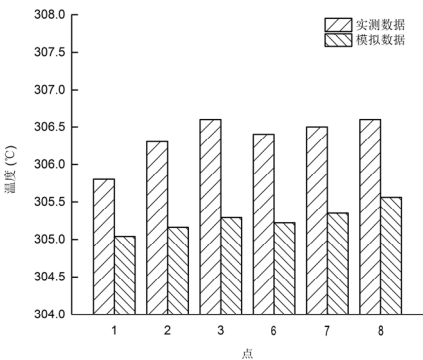


图 3 模拟与实试验验证对比

Fig. 3. Comparison of the validation of the CFD model

4 模拟计算结果与讨论

4.1 空气间层的风速分布

如图 2 该通风外墙进风口为一直径 0.1 m 的风管, 位于窗户一侧下方; 出风口位于墙体顶端与空气间层截面一致. 空气从进风口送入绕窗分左右两侧流过, 最后从上侧出风口排走. 由于该通风墙体采用主动送风, 外墙面温度对间层的流速分布基本无影响, 图 4 为工况四的空气间层流速分布.

通风墙体的进风口流速很大, 空气送入间层后流向改变, 风速显著减小. 在空气间层中心剖面上

取点 1-8 (如图 5 所示) 分析墙体空气间层不同区域的风速变化特征如图 6 所示. 流速分布整体呈现出沿气流流向逐渐将低的特征, 且在流向改变区域风速衰减明显, 如点 6 所示. 而窗上方区域距进风口最远且受遮挡, 各工况下此处气流速度均明显低于其它区域. 可见对于带窗的通风墙体, 空气间层的流速存在显著不均匀性. 各区域流速差异明显. 间层通风量越大流速分布越不均匀, 这也必将影响空气间层的对流换热效果.

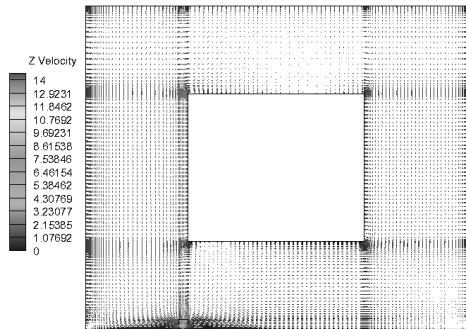


图 4 工况 4 空气间层中心剖面风速分布图

Fig. 4 Velocity distribution of the vertical center section in the air gap (Case 4)

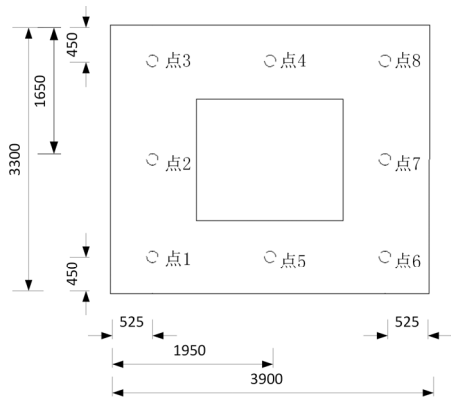


图 5 空气间层中心剖面数据采集示意图

Fig. 5 Scheme of the points for data acquisition

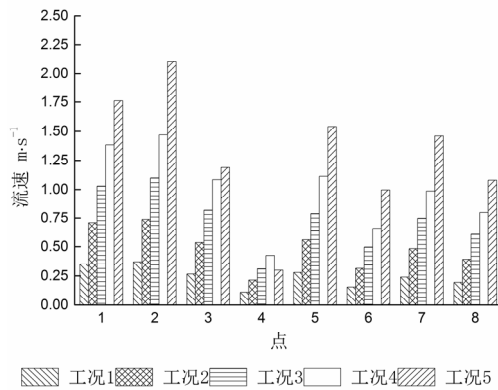


图 6 工况 1-5 各点流速对比图

Fig. 6 Comparison between the velocity at the points for five cases

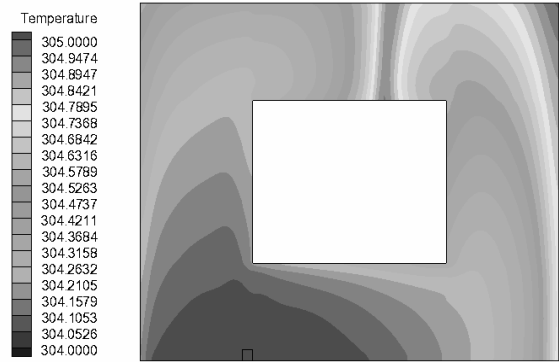


图 7 工况 4 空气间层中心剖面温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution of the vertical center section in the air gap (Case 4)

4.2 空气间层的温度分布

室内排风送入墙体间层后, 随着其与两侧壁面间对流换热的发生, 气流温度沿流向逐渐升高, 图 7 为工况 4 的空气间层中心剖面温度分布. 图 8 为工况 4 通风外墙截面温度分布. 如图所示, 墙体空气间层断开了内外层墙体的导热. 流动空气层能有效带走室外传入的热量, 显著降低空气层两侧壁面的温度. 而内层墙体空气层壁面温度的降低, 对于减小室内墙面辐射温度, 改善室内舒适度意义重大. 分析各工况模拟结果, 内层墙体空气层壁面温度均与流动空气层温度相近, 且其值随间层流速的增大而减小. 间层平均风速从 0.25 m/s 升高至 1.25 m/s 时, 内层墙体空气侧壁面温度依次降低了 0.579℃、0.211℃、0.118℃、0.062℃. 而随各工况外墙面温度的降低, 内层墙体空气侧壁面温度呈线性下降, 数值约 0.12℃.

空气间层的气流温度沿其流向逐渐升高, 图 9 为窗户两侧气流沿高度方向上的温度变化, 可见各工况下气流温度沿流向的变化率差异明显. 同时同一工况的窗户两侧气流温度变化趋势基本一致, 只是左侧气流由于进出口间路径较短温度更低. 提高空气间层通风量能有效减小间层气流沿流向的温度上升, 从而提高墙体的隔热性能. 对工况 1-5, 窗户两侧气流温升均值依次为 1.487℃、0.832℃、0.584℃、0.415℃、0.316℃. 而对不同外墙面温度工况, 气流沿流向的温度上升随外墙面温度升高而增大. 外墙面温度从 35 升至 55℃时, 温度升高依次为 0.120℃、0.225℃、0.412℃、0.470℃、0.642℃. 外墙面温度变化对间层气流的温度影响明显不及通风量的改变显著.

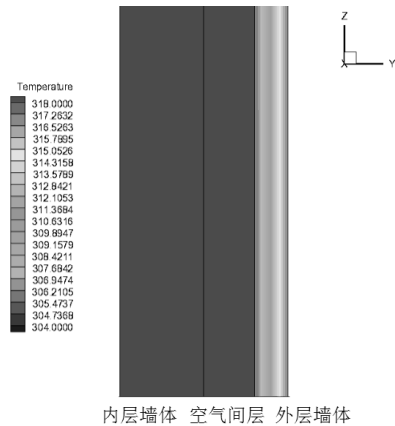


图 8 工况 4 空气间层截面温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution of the transverse section in the air gap (Case 4)

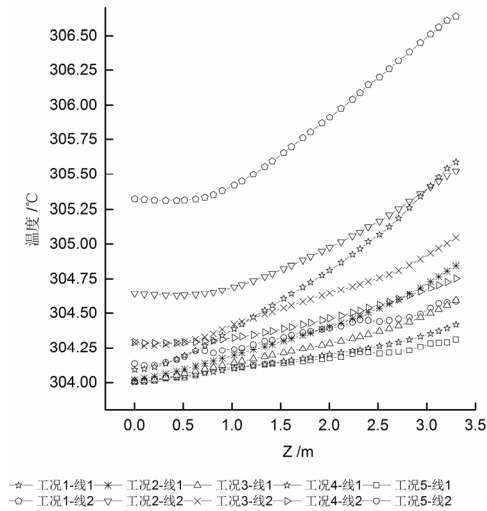


图 9 不同通风量工况气流沿高度的温度分布图

Fig. 9. Profiles of air temperature at different height

4. 3 通风外墙的隔热性能分析

表 4 主动通风式高效保温隔热外墙热工计算结果  
Tab. 4 Results of the thermal calculation

	外层墙体 空气侧壁面温度/℃	内层墙体 空气侧壁面温度/℃	外层墙体 传热量/W·m <sup>-2</sup>	内层墙体 传热量/W·m <sup>-2</sup>	通风墙 热阻/ m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup>	空气间层带 走热量/%
工况 1	32.458	32.261	10.338	0.984	14.241	90.48
工况 2	31.893	31.682	10.804	0.532	26.313	95.08
工况 3	31.668	31.471	10.99	0.365	38.459	96.68
工况 4	31.617	31.353	11.032	0.275	50.905	97.51
工况 5	31.515	31.291	11.116	0.229	60.082	97.94
工况 6	31.199	31.117	3.133	0.091	43.956	97.10
工况 7	31.409	31.228	7.082	0.178	50.562	97.49
工况 8	31.922	31.481	14.903	0.375	50.667	97.48%
工况 9	32.058	31.604	18.912	0.471	50.955	97.51%

4.3.2 外墙面温度的影响

由表 4 结果可知, 在外墙面温度为 40℃-55℃ 时, 通风外墙热阻在 50.562-50.955 (m<sup>2</sup>K)/W 之间, 变化率不到 1%。而在外墙面温度为 35℃ 时, 通风

通风外墙热工计算结果见表 3, 其中通风墙热阻由换入室内的热量与室内外墙面温差决定, 空气间层带走热量百分比为内外层墙体传热量之差占外层墙体传热量的比例。表 4 结果说明: 通风空气间层能非常有效地阻挡热量从外层墙体传入内层墙体, 各工况下流动空气层带走了 90.48%~97.94% 的外部热量, 使墙体具有很高的隔热性能。

4.3.1 空气间层通风量的影响

墙体通风量增大加强了空气间层的对流换热, 流动空气层带走更多热量, 墙体热阻随之增大如表 3。为分析间层空气流动状态对通风墙热阻的影响, 以便预测不同通风状态下的墙体隔热性能。对墙体热阻  $R$  与空气间层平均风速  $V$  进行回归分析, 拟合得到二者之间有很好的线性关系如图 10, 可得墙体热阻回归方程如下:

$$R = 46.510V + 3.118 \tag{6}$$

图 11 为不同通风量工况及不同外墙面温度工况下的墙体传入室内的热量对比图。墙体传热量随空气间层平均风速的增加而减小, 并且减小幅度渐趋平缓。平均风速从 0.25 m/s 升高到 0.5 m/s 时, 墙体传热量减小了 45%。而平均风速由 1 m/s 升至 1.25 m/s 时, 传热量仅减小了 0.046 W/m<sup>2</sup>, 改善作用很小。墙体间层风速过小, 不能充分发挥其隔热性能。对本文所研究的主动通风式高效保温隔热外墙, 应保持其间层平均风速在 0.5 m/s 以上。

外墙热阻为 43.956 (m<sup>2</sup>K)/W, 相比其他外墙面温度工况低约 13%。因为此时室外墙面与空气间层温差过小仅 4℃, 导致墙体热阻的计算在该温差下准确度不如其他工况。同时图 11 也反应墙体传热量随

外墙面温度升高而线性增长。总体而言,外墙面温度变化对墙体热阻值影响很小,通风外墙有着稳定的隔热性能。

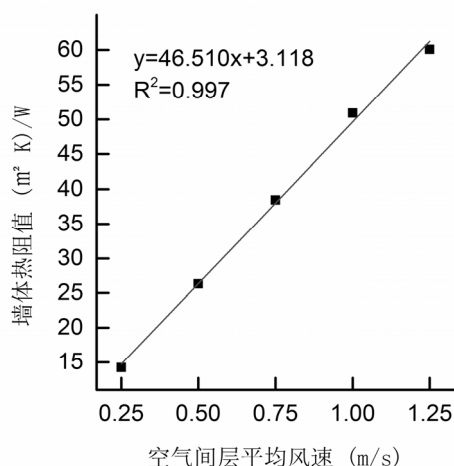


图10 墙体热阻与空气间层平均风速拟合图

Fig. 10 The ventilated thermal resistance as a function of the average air velocity

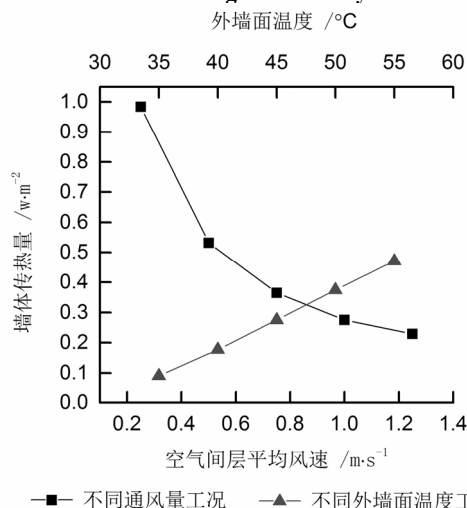


图11 不同通风量及外墙面温度下墙体传热量对比图

Fig. 11 Comparison of the heat transfer rate under different flow rate of the air gap and different external wall temperature

## 5 结论

(1)夏季工况下,主动通风式高效保温隔热外墙有着很好的隔热性能。墙体利用室内排风形成流动空气间层,能有效带走90%以上的室外传入热量,使通过内层墙体的热量显著降低。

(2)通风外墙利用流动空气层断开了内外层墙体的导热,显著降低了内层墙体温度。而室内墙面温度的降低,利于提高室内舒适度。

(3)通风外墙热阻随空气间层通风量的增加而增大。拟合得到了热阻值与间层平均风速间的线性

回归方程,可用于预测不同通风状态下的墙体热阻。对本文所研究的通风外墙,运行时应将间层平均风速控制在0.5 m/s以上,能较好地发挥流动空气间层作用,提高墙体隔热性能。

(4)通风外墙隔热性能对外墙面温度变化不敏感,外墙面温度在40~55℃之间时,墙体热阻值基本保持不变。应用本文方法得到墙体热阻来估算墙体负荷是可行有效的,但若要精确计算实时负荷,还需考虑外墙面温度随时间变化对墙体传热过程的影响。

## 参考文献 References

- [1] 杨玉苹,谢婧,崔广为,等. 干挂饰面砖幕墙聚苯复合外墙外保温施工技术[J]. 建筑技术,2006, 37(2):114-115.  
YANG Yuping, XIE Jing, CUI Guangwei, et al. Exterior insulation construction technology for dry-stuck face brick curtain wall with composite polyphenyl sheets[J]. Architecture technology, 2006, 37(2):114-115.
- [2] 施工技术,"揭秘绿色建筑领域18项高科技",  
[http://www.igreen.org/2014/0827/4925.html\(2014/8/27\)](http://www.igreen.org/2014/0827/4925.html(2014/8/27)).  
Construction technology,"18 sets of high technique in the fields of green building"
- [3] BALOCCO C. A simple model to study ventilated facades energy performance [J].Energy and Buildings, 2002,34 (5): 469-475.
- [4] PATANIA F, GAGLIANO A, NOCERA F, et al. Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades[J]. Energy and Buildings,2010,42(7):1148-1155.
- [5] DE GRACIA A, CASTELL A, NAVARRO L, et al. Numerical modelling of ventilated facades: A review [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22(C): 539-549.
- [6] RAYMOND J, BILGEN E. On the thermal and ventilation performance of composite walls [J].Energy and buildings,2007,39(9):1041-1046.
- [7] DE GRACIA A, NAVARRO L, CASTELL A, et al. Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications[J].Energy and Buildings, 2013, 65(7): 508-515.
- [8] SEFERIS P, STRACHAN P, DIMOUDI A, et al. Investigation of the performance of a ventilated wall[J].Energy and Buildings, 2011,43(9):2167-2178.
- [9] 路延魁.空气调节设计手册[M].北京: 中国建筑工业出版社,1995: 53-54.  
LU Yankui. Design manual of air-conditioning [M]. Beijing: China building industry press,1995: 53-54.
- [10] ABE K, KONDOH T, NAGANO Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows-I. Flow field calculations[J]. International journal of heat and mass transfer, 1994, 37(1): 139-151.

(本文编辑 吴海西)