文章编号：1008－8857(2026)01－0001－05 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.01.001

基于竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙耦合的办公建筑数值模拟分析

曹双华，郭鹏远
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘 要：利用竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙结合的方式解决混合通风供热时出现的热风停滞在房间顶部造成无效能源消耗的问题，并探讨了两个系统耦合对室内热环境的影响。首先，采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法研究了竖壁贴附通风下不同工况对办公室内温度场的影响，然后对竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙耦合办公室进行了热环境分析。结果表明：当竖壁贴附通风在送风速度为 6.0 m/s、送风温度为 27.0 ℃ 时，房间下部区域平均温度可以达到设计温度 20.0 ℃，且此时上下部区域温差最小为 0.38 ℃。当竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙耦合后房间下部区域平均温度增加到 20.9 ℃，之后将下部区域平均温度降为 20.0 ℃ 时，竖壁贴附通风的送风温度可由 27.0 ℃ 降为 24.5 ℃，从而实现利用太阳能节能的目的。

关键词：竖壁贴附通风；PV−Trombe 墙；数值模拟；室内热环境
中图分类号：TU83 **文献标志码**：A

Numerical analysis of an office building with coupled vertical wall-attached ventilation and PV-Trombe wall

CAO Shuanghua，GUO Pengyuan
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In mixed ventilation heating systems, hot air often stagnates in the upper zone of the room, leading to inefficient energy use. To address this issue, this study proposes a coupled system combining vertical wall-attached ventilation and a PV-Trombe wall. Using computation fluid dynamics (CFD) simulations, the impact of this coupling on the indoor thermal environment is investigated. Firstly, various operating conditions of vertical wall-attached ventilation in an office are analyzed to assess their effects on the temperature field. Subsequently, the thermal environment of the office with the coupled system is analyzed. The results indicate that, when vertical wall-attached ventilation operates at a supply air velocity of 6.0 m/s and a temperature of 27.0 ℃, the average temperature in the lower area of the room can reach the design temperature of 20.0 ℃, with a minimal temperature difference between the upper and lower parts of 0.38 ℃. Upon coupling

收稿日期：2023－12－13
第一作者：曹双华(1976—)，讲师。研究方向：建筑热环境营造与模拟。E−mail：csh_h@163.com

with the PV-Trombe wall, the average temperature in the lower area increases to 20.9 ℃. Subsequently, by reducing the supply air temperature of the ventilation system from 27.0 ℃ to 24.5 ℃ while maintaining the lower area at 20.0 ℃, energy savings are achieved through the utilization of solar energy.

Keywords: vertical wall attached ventilation; PV-Trombe wall; numerical simulation; indoor thermal environment

能源对当今社会和人类未来的发展至关重要，因此可再生能源的投入使用对于缓解能源危机起到了不可或缺的作用[1]。当前建筑能耗已成为建筑领域的研究热点[2−3]，将太阳能应用技术和高能耗的建筑相结合是建筑节能的有效途径之一[4−5]。光伏建筑一体化 Trombe(PV−Trombe)墙就是一种利用太阳能的建筑外墙[6−7]，它可以将太阳能转化为电能供建筑使用，同时还可以利用太阳能板产生的热量加热流道内的空气，最终通过空气将热量传递到室内，从而起到供暖的作用[8]。竖壁贴附通风是利用送风机将处理好的空气沿着墙壁送出，使空气能够竖直往下流动，在到达水平面后能够扩散得更远，从而有效利用热空气，避免出现因热浮力的作用使热风气流较难到达房间下部的问题，改善大量热空气聚集在房间上部的情况[9]。但是竖壁通风对于送风速度的要求较高，要使纵深较深的房间舒适性良好且满足房间温度需求就必须增大送风速度，但是无限增大送风速度不仅会造成能源消耗，而且会使得房间的舒适性下降，因此需要对送风温度和送风速度进行合理的选择并考虑将竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙相结合。对于 PV−Trombe 墙系统的研究已从理论研究发展到实际应用，再到现在的智能化控制阶段，这为其与竖壁贴附通风的耦合提供了坚实的基础。传统的 Trombe 墙仅利用太阳能辐射热来强化自然通风实现对建筑室内的供暖[10]，而未实现光伏光热一体化，不能同时达到发电、供暖的目的。PV−Trombe 墙将太阳电池与 Trombe 墙相结合，能同时产生热能和电能。季杰等[11]提出了将太阳能光伏电池贴附在 Trombe 墙系统的玻璃盖板背面的结构，即外置式光伏 Trombe 墙系统，一种结合了光伏技术和 Trombe 墙原理的建筑外墙[11]，并对其做了很多试验研究和理论分析，分析了其在不同电池覆盖率、流动起因、南墙有无外窗及光斑对系统的热电性能的影响[12]。

综上可知，很少有研究人员将太阳能光伏板和竖壁贴附通风设备放在一起研究。鉴于此，本文提出了一种新型竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙相结合的办公室建筑系统，旨在探讨两者的耦合关系，通过分析系统的建筑节能效果对其结合形式进行优化，为建筑节能提供新的思路和方法。

1 物理模型的建立

以某办公室为原型，按 1:1 进行建模。图 1 为办公室房间模型。房间内部几何尺寸为 6.19 m × 2.8 m × 3.44 m。将 PV−Trombe 墙放置在南墙外立面[13]，将竖壁贴附通风系统放置在北面的内墙顶部，从而构建 PV−Trombe 墙和竖壁贴附通风耦合的办公室房间模型。竖壁贴附射流送风口紧贴墙面布置，尺寸为 0.05 m × 0.64 m，排风口尺寸为 0.2 m × 0.7 m[14]。PV−Trombe 墙系统从室外侧到室内侧依次包括玻璃盖板、光伏电池、

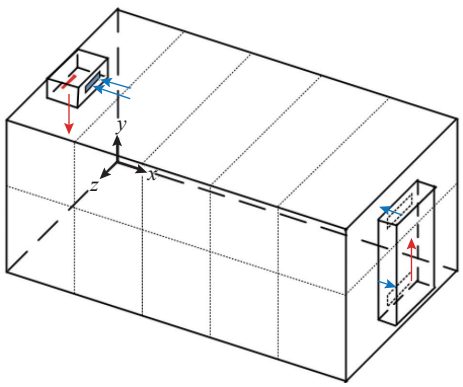

图 1 办公室房间模型

Fig. 1 Office room model

吸热板、空气流道和墙，其中空气流道宽度为 0.120 m，墙厚度为 0.400 m，PV−Trombe 墙外形尺寸(高度 × 宽度)为 2 m × 1.08 m，光伏电池板表面能产生的热流密度为 300 W/m^2[15]。为了便于计算将房间沿 x 轴正向均分为 5 个区域，从左至右编号依次为① ～ ⑤，以 y 轴正向 1.8 m 处为分界线将每个区域又分为上、下部区域，如图 2 所示。

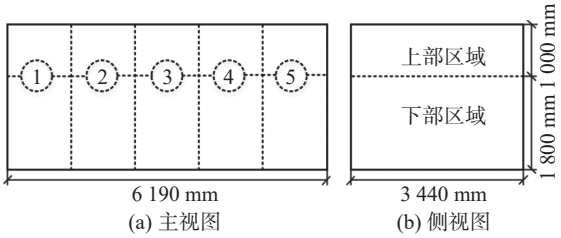

图 2　房间区域划分

Fig. 2　Room zoning diagram

2　数值模型建立及参数设定

利用 GAMBIT 软件对办公室房间进行物理模型建立和网格划分，如图 3 所示。为了保证模拟计算的准确性，对送回风口、竖壁通风区域、PV−Trombe 墙附近等存在较大温度和速度梯度的区域进行局部网格加密处理，而其他区域网格则较为稀疏。经网格独立性验证后最终确定网格数量为 234 110 个。

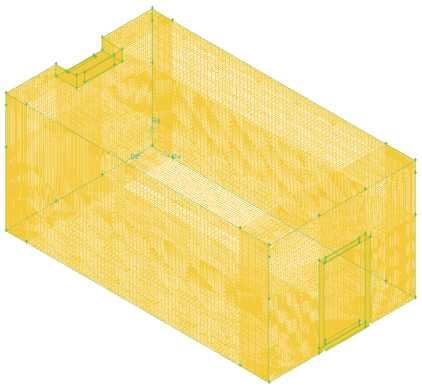

图 3　办公室房间模型网格划分

Fig. 3　Mesh of the office room model

本文模拟时考虑到房间内空气属于不可压缩流体，因此可将其视为理想气体，其密度仅随温度变化，以此确定采用湍流控制方程。采用 Boussinesq 假设，湍流计算模型采用 Standard k–ε 模型和增强壁面函数的处理方法，数值计算时采用有限体积法对物理模型进行离散，选择分离隐式求解器并使用 SIMPLEC 算法。计算时采用稳态求解，收敛的判定条件是房间整体的体积、温度保持不变，以及连续性方程，x、y 和 z 方向的速度，k 和 ε 方程残差均小于 10^{-3}，能量方程残差小于 10^{-6}。

本文竖壁通风系统的送风口设定为速度入口，回风口设置为压力出口。房间墙的围护结构相关参数分别为内墙温度 18.5 ℃、外墙温度 16 ℃、天花板温度 18 ℃ 以及地板热流密度 21.29 W/m^2。在 PV−Trombe 墙系统中设置光伏电池板背面的热流密度为 300 W/m^2。

3　数值模拟与分析

3.1　竖壁贴附通风模拟分析

在竖壁贴附通风系统中因射流惯性力与热浮力方向相反，为了阻止热风气流过早、过快上升至房间上部，以保证热风与室内下部空间混合均匀，送风口的送风速度以及温度成为影响房间整体热环境的重要因素。根据文献 [16] 可知，竖壁贴附通风房间的冬季送风速度宜控制在 3.5 ～ 6.0 m/s 之间。根据此速度范围通过数值模拟计算出若要使房间下部区域温度达到 20 ℃，那么 3.5 m/s 的送风速度所对应的送风温度应为 31.0 ℃，6.0 m/s 的送风速度所对应的送风温度应为 27.0 ℃。选取模拟工况的送风温度分别为 27.0、28.0、29.0、30.0、31.0、32.0 ℃，对应的送风速度分别为 6.0、5.2、4.6、3.9、3.5、3.0 m/s，以分析竖壁贴附通风对室内热环境的影响。模拟后所得结果列于表 1 中。

由表 1 可知，在适当的送风温度与送风速度下，6 种工况下下部区域平均温度均达到(20.0±0.5) ℃，满足设计要求。但随着送风温度的提高，上部区域平均温度逐渐升高，同时上下部区域温差也增大，而上部区域平均温度均高于下部区域平均温度。为实现节能，应使房间上下部区域平均温差更小。由表 1 可以看出，工况一上下部区域温差最小为 0.38 ℃，温度均匀性最

表 1 竖壁贴附通风工况及房间平均温度

Tab. 1 Vertical wall-attached ventilation conditions and average temperatures of the room

工况	送风温度/℃	送风速度/（m·s^{-1}）	上部区域平均温度/℃	下部区域平均温度/℃	上下部区域温差
工况一	27.0	6.0	20.40	20.02	0.38
工况二	28.0	5.2	20.51	20.03	0.49
工况三	29.0	4.6	20.61	20.03	0.58
工况四	30.0	3.9	20.69	20.00	0.69
工况五	31.0	3.5	21.53	20.50	1.03
工况六	32.0	3.0	21.72	20.26	1.46

优；工况四至工况六上下部区域温差均大于 0.68 ℃，其中工况六的温差最大为 1.46 ℃，温度均匀性明显较差。图 4 为房间下部区域平均温度。从图中可看出：工况一下部区域③的温度相较于其他工况的高，且更接近 20 ℃；工况二、三、四、五、六下部区域①、②的温度整体高于工况一的，这使得邻近区域的温差较大从而导致温度分布不均匀；6 种工况下部区域④、⑤的温度变化均较小。综上所述，工况一的送风温度和送风速度是竖壁贴附通风较为合理的送风参数。较低风速（3.0 ～ 4.0 m/s）虽可使下部区域达到设计温度，但温度均匀性变差，能耗更高。

3.2 竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙耦合系统模拟分析

耦合系统中竖壁贴附通风系统采用工况一的送风温度及送风速度，PV−Trombe 墙系统产生的热量采用热流密度来衡量，将此时的耦合系统定义为工况七。通过模拟确定当竖壁通风系统送风温度由 27.0 ℃ 降为 24.5 ℃ 时下部区域平均温度可达到 20.0 ℃，将此时定义为工况八。通过模拟得出每个区域的平均温度，结果如图 5 所示。从图中可知：工况七下部各区域的平均温度均相对工况一的提高了 0.5 ℃，对于上部区域，越靠近 PV−Trombe 墙区域，温度提高得越多，最高提高了 2.3 ℃；工况七上部区域平均温度为 21.4 ℃，下部区域平均温度为 20.9 ℃，相较于工况一的分别提高了 1.0、0.9 ℃；工况七房间整体温度由 20.5 ℃ 提高到 21.5 ℃。可见，该耦合系统可使房间整体温度提高，但也会使局部区域温度过高且高于所需要的 20.0 ℃，因此可通过降低耦合系统中竖壁通风系统的送风温度降低能源消耗。

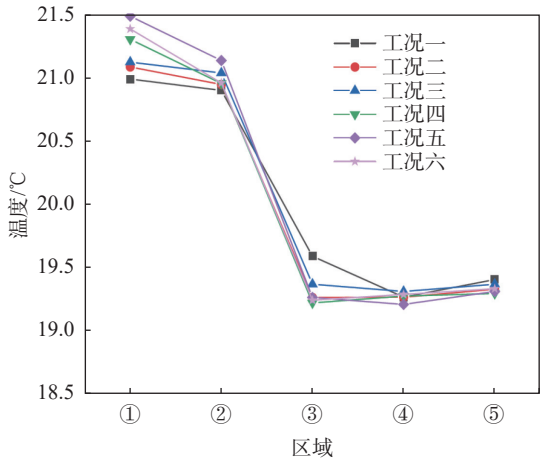

图 4 房间下部区域平均温度

Fig. 4 Average temperature in the lower area of the room

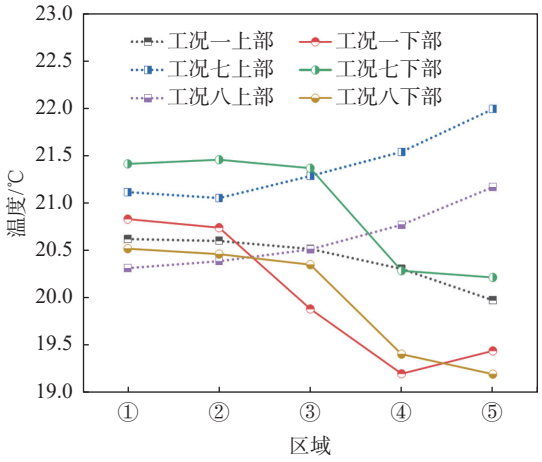

图 5 房间上、下部区域平均温度

Fig. 5 Average temperature in the upper and lower areas of the room

由图 5 可知：工况八上部各区域温度相较于工况七的整体下降约 1 ℃，但仍维持在 20.0 ℃ 以上，且下部区域也存在相似情况；工况一与工况八下部区域温度变化趋势基本一致；工况八下部区域①、②的温度更接近设定所需温度 20.0 ℃，下部区域③温度未出现骤降，且相比于工况一的高出 0.5 ℃；工况一与工况八下部区域④和⑤的温度基本保持不变，工况八区域⑤的温度比工况一的高 1.2 ℃。由此说明，增加 PV−Trombe 墙可使竖壁贴附通风送风温度由原

来的 27.0 ℃ 降为 24.5 ℃。这不仅可以使室内温度达到所需设定温度，而且根据《实用供热空调设计手册》[17]可知，供热工况下，室内温度每降低 1 ℃，供热能耗降低 10% ～ 15%。该耦合系统可增加室内气流扰动，减少温度不均匀现象的出现，从而降低能耗。

4　结论

（1）竖壁贴附通风系统的送风参数对办公室热环境影响显著。在送风速度 6.0 m/s、送风温度 27.0 ℃ 时，房间下部区域平均温度可达到设计值 20.0 ℃，上下部区域温差最小（0.38 ℃），温度分布最均匀；3.0 ～ 4.0 m/s 送风速度工况虽能满足下部区域温度要求，但上下部区域温差均大于 0.68 ℃，温度均匀性较差，能耗更高。

（2）竖壁贴附通风与 PV−Trombe 墙耦合后，房间整体平均温度由 20.5 ℃ 提升至 21.5 ℃，下部区域平均温度达 20.9 ℃，室内热环境整体得到改善。

（3）将耦合系统中竖壁贴附通风送风温度由 27.0 ℃ 降至 24.5 ℃，可使下部区域平均温度维持在 20.0 ℃，从而降低电能消耗，实现太阳能高效利用。该耦合系统可增强室内气流扰动，优化温度分布均匀性，为建筑节能提供了新的技术路径。

参考文献：

[1] 马丽梅, 司璐. 低碳城市与可再生能源技术创新 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(7)：81 − 90.

[2] 陈伟珂, 罗方. 基于全生命周期理论的建筑能耗问题研究 [J]. 建筑科学, 2008, 24(10)：23 − 27.

[3] 曹双华, 郭虹雨, 龚婉婷. 基于 XGBoost 算法的夏热冬冷地区办公建筑围护结构的负荷预测 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(2)：90 − 97.

[4] 宋金昭, 杨建平, 杭伟. 被动式太阳能建筑节能经济优化研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(8)：1425 − 1429.

[5] EBADATI M, LORK A, ALIZADE ELIZEI M H. Energy efficiency of residential buildings in Tehran climate by saving energy[J]. International Journal of Ambient Energy, 2023, 44(1)：177 − 185.

[6] JOVANOVIC J, SUN X Q, STEVOVIC S, et al. Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design[J]. Energy and Buildings, 2017, 152：568 − 576.

[7] AMABILE L, BRESCH-PIETRI D, EL HAJJE G, et al. Optimizing the self-consumption of residential photovoltaic energy and quantification of the impact of production forecast uncertainties[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 2：100020.

[8] 苏亚欣, 徐小炜, 邓文义. 电池内置式 PV−Trombe 墙的热利用特性数值研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(10)：2639 − 2646.

[9] 韩腾, 邓红娜, 李安桂, 等. 竖壁贴附通风与混合通风供热方式室内热环境及通风性能实测比较 [J]. 暖通空调, 2021, 51(10)：138 − 144.

[10] DUAN S P, JING C J, ZHAO Z Q. Energy and exergy analysis of different Trombe walls[J]. Energy and Buildings, 2016, 126：517 − 523.

[11] JI J, YI H, PEI G, et al. Numerical study of the use of photovoltaic-Trombe wall in residential buildings in Tibet[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007, 221(8)：1131 − 1140.

[12] SUN W, JI J, LUO C L, et al. Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design[J]. Applied Energy, 2011, 88(1)：224 − 231.

[13] ZHANG H L, SHU H W. A comprehensive evaluation on energy, economic and environmental performance of the Trombe wall during the heating season[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(6)：1141 − 1149.

[14] 韩腾, 熊建国, 邓晶, 等. 竖壁贴附通风供热模式水平贴附射程及热环境特性 CFD 模拟 [J]. 暖通空调, 2021, 51(8)：130 − 136, 113.

[15] 朱琦彬, 苏亚欣. 内置式 PV−Trombe 墙对室内通风特性的影响 [J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(5)：80 − 82, 90.

[16] 韩腾. 竖壁贴附通风水平贴附射程及室内热环境研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.

[17] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.