

Trombe墙技术在高层住宅中的创新应用：研究进展与未来挑战

李媛媛^{*1,2} 王禧龙¹

1. 北方工业大学 北京 100144

2. 中国建筑科学研究院 北京 100013

摘要：本文系统梳理了Trombe墙在高层住宅中的技术原理、分类及创新设计，重点评述了相变材料（PCM）复合、光伏集成（PV-TW）与智能调控等关键变体对储热效率和舒适性的提升作用。通过案例分析与模拟研究发现，PCM-Trombe墙可将采暖能耗降低11%–35%，PV-TW系统可为建筑提供约20%供暖能耗补偿，并实现20kWh/m²级别的年发电量；模块化预制与参数化优化策略有效兼顾立面采光与热工性能。然而，高层应用中仍面临夏季过热、结构荷载与材料轻质化、复杂风压影响及成本效益平衡等挑战。未来需聚焦新型智能材料（可调透光玻璃、低密度蓄热体）、数字化设计与控制系统集成，并推动示范项目与政策支持，以助力Trombe墙在高层住宅领域的大规模低碳应用。

关键词：Trombe墙；高层住宅；绿色建筑；热传递；光伏-Trombe墙

1 引言

1.1 研究背景

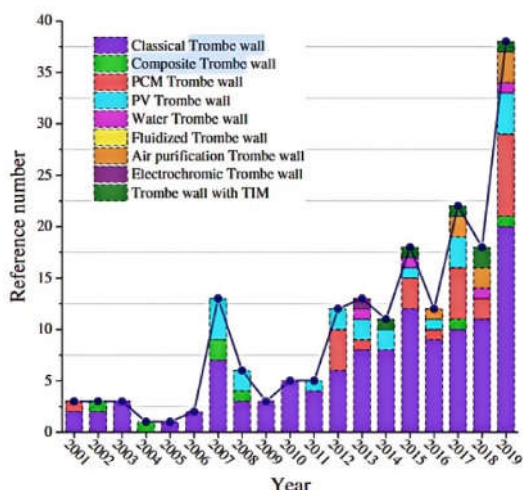


图1 ScienceDirect、SpringerLink、Taylor & Francis Online、SAGE Journals、Wiley Online Library 和 MDPI 对Trombe墙的研究综述

全球建筑部门能源消耗占比持续攀升（图1）^[1]。国际能源署报告表明，全球建筑住宅能耗占全球总量约32%，其中暖通能耗占比40%–60%。在“双碳”目标驱动下，被动式太阳能技术因其低能耗特性成为建筑领域研究焦点。Trombe墙作为经典的被动式太阳能技术，法国奥代洛设计了世界首个Trombe墙，并将其应用于低层建

筑中。Trombe墙主要是利用深色蓄热墙体与外界玻璃罩组成热库，把太阳能收集后再次以辐射或者对流的方式送回室内；由于Trombe墙更易受到地形条件限制和区域温差影响，早期多应用在低层建筑中。随着社会发展，目前Trombe墙的应用渐渐从低层建筑迁移到高层住宅中，在高层住宅应用规模最大是在21世纪初。另外，高层住宅所特有的竖向空间（较同等规模的普通住宅平均立面面积增加2.1~3.5倍）、热压差效应（高层建筑每增加10m,则热压通风速率为原来的1.12~1.18倍）等天然优势为Trombe墙热循环创造了良好环境^[2]，但随着高空布置增加了结构自重要求，导致不利于外围护体系材料选择，使热工调控更为复杂，存在一定难度。

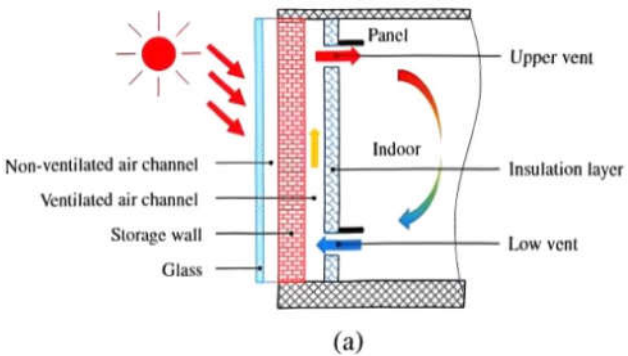
1.2 研究意义

Trombe墙对于寒冷地区高密度高层住宅节能效果十分显著，利用Trombe墙被动式太阳能的技术特点（透光率 $\geq 85\%$ ，蓄热墙体是普通混凝土或相变材料，开孔率占总面积的5%–8%），通过三层协调配合的效应充分捕获太阳辐射能量并实现热回收再利用。如某住宅项目应用了复合式的Trombe墙（图2），模块化的Trombe墙单元能达到1~1.5次/h的空气交换量，并且能通过立面拼接来调节并达到热效与空域的灵活使用。根据试验结果表明：模块化设计相比原方案降低单位面积能耗24%，相较于采用相变蓄热材料墙体节能率为11.3%，相较于加装电加热保温型玻璃幕墙方案降低冬季供暖能耗31.7%，同时在满足节能的条件下，还要考虑到高层建筑立面的节能和美观问题，通过合理的将模块化Trombe墙单元和玻璃幕

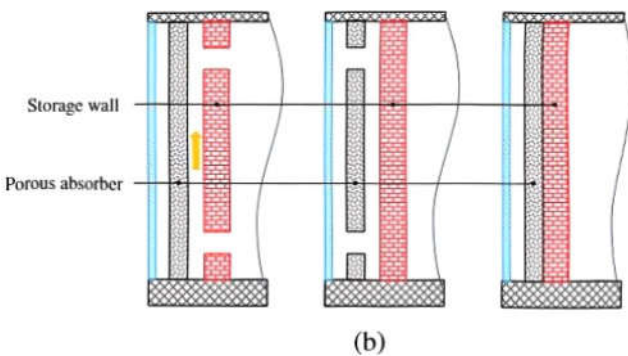
作者简介：李媛媛（1992.06-），女，研究生/工程师，主要研究方向建筑技术与理论，E-mail:daisyhost@163.com

墙错位拼接,使整体的透光率达到 $\geq 65\%$,表皮能耗强度比降低约24%^[3-4]。这表明Trombe墙不仅可以减少碳排放

量而且可以实现建筑美学从“形式追随功能”到“形式融合性能”范式的转变。



(a) 一种复合式Trombe墙



(b) 一种带有多孔吸收器的新型复合式Trombe墙

图2 复合式Trombe墙

2 Trombe 墙的技术原理与分类

2.1 基本结构与工作原理

Trombe墙是一种典型的被动式太阳能加热系统,其核心由高热容墙体、透明罩层及空气循环通道三部分协同构成。墙体为150-300mm厚的砖墙或者普通混凝土墙体,选用深色选择性吸收层使墙体具有较好的吸收太阳辐射功能;墙体内侧为蓄热体材料,可快吸收慢释放热量,墙体外表加设高透光玻璃层将建筑包围起来,并在墙面和蓄热墙体之间保留20~40mm的空隙,不仅隔绝外界冷空气与墙体的辐射换热过程,同时空隙是热空气向上的自然对流通道的。墙上部及下部设置进风口、出风口,占墙面总面积的5%-8%,用作自然通风换气或辅以机械通风进行换气,实现室内空气流动。

Trombe墙的工作原理基于“温室效应+热对流”双重机制。在冬季白天太阳辐射透过高透光玻璃层照射到空气层中时,会首先加热空气层中的空气,然后加热层空气再向蓄热墙进行辐射传热,从而使墙吸收大量的热量,并储存起来;随后,加热后的空气向上流动到墙上部,再经上部通风口进入室内;同时室内冷空气由下部通风口吸入进入空气层,两者形成了自然对流的回路,从而将储存在墙内的热量转移到室内,产生被动供暖的效果。夜晚由于外界温度急剧下降,外界环境温度低于内层墙壁材料温度,内外温差较大,会继续以辐射、导热的方式将多余热量释放给室内,维持室内温度稳定,到了夏天气温较高时,可以上下班打开通风口来减少热量传导进入室内或者在玻璃外面加上遮阳帘使进入室内的热量变少,夜间打开通风口把空气层里面聚集着的高温废气放出去,再把外部的冷气引进来,用夜晚的冷空气自然降温。

为了使系统运行效率更高,国内外学者相继提出了一些不同变体以及改进的方法。其中,光伏-Trombe墙(PV-TW)利用玻璃罩层与蓄热墙之间设置的薄膜光伏组件发电,并将光伏组件中剩余的热量导入到空气层或者蓄热墙体中;相变材料(PCM)复合式Trombe墙是在蓄热墙体的内部或者墙面粘贴石蜡或脂肪酸等共晶体系PCM,用以固-液相变吸放热,从而增大了单位体积内的储热密度以及减少了室内的温差变化幅度,进而改善了室内的热舒适度(图3);另外,具有光热催化表面涂层能够吸附分解室内挥发性有机物,将室内的污染物去除掉,并且还能够达到供热水的目的,起到辅助作用。对于其智能调光及通风控制问题,常用的方式是应用可调角度百叶窗和电动滑轨式可变开口,结合温度传感器与控制系统完成对光照及气流的自动调节^[5]。通过对整体系统做各种层次的改造,并将其功能集合到一处。目前的Trombe墙已经基本形成“高储热+发电+智能调控”的系统一体化结构。

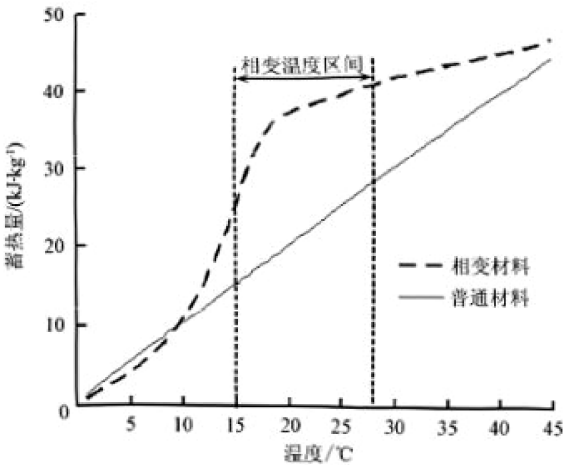


图3 相交蓄热墙体材料与普通建筑材料的蓄热性能比较

2.2 技术变体与创新设计

(1) 复合式Trombe墙

PCM-Trombe 墙：将嵌入石蜡(相变温度 $22 \sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$)或脂肪酸类PCM(如月桂酸—硬脂酸共晶体系)后的储热密度提高到 $2.5 \sim 3.2\text{ MJ/m}^3$ 。据清华大学实验，在PCM层厚度为 50 mm 的情况，室内温差可减小约41%(图4)^[3-4]，(左)冬季供暖，(右)夏季制冷。

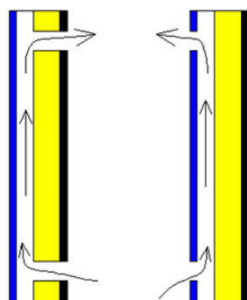


图4 PCM-Trombe墙示意图

将PV-TW(光伏Trombe墙)置于双层玻璃空腔中，在内侧嵌入碲化镉薄膜光伏板(PV)，利用碲化镉薄膜光伏板所产生的光伏废热通过空气夹层导入到蓄热墙体内。法国试点项目证明：采用PV-TW的建筑供暖耗能较未使用PV-TW方案降低约20%；

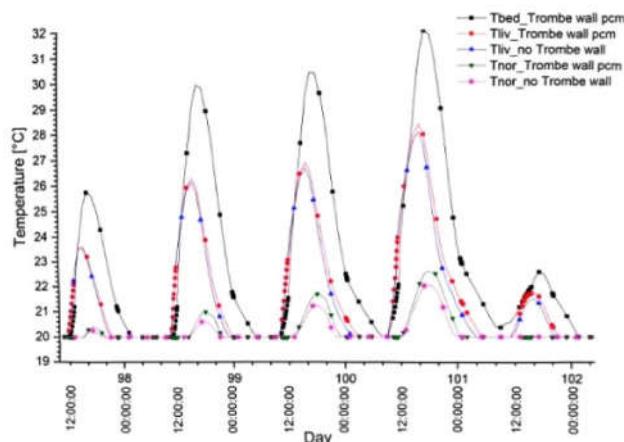


图5 不同卧室配置下客厅与北向房间的温度对比：对比配置有/无相变材料Trombe墙的情况

(2) 混合通风系统

结合机械风机(功率 $\leq 30\text{ W}$)主动调节气流克服纯被动式的气候适应性局限性：冬季运行模式下，通过风机配合，热风流速增大至 $0.8 \sim 1.2\text{ m/s}$ ，热效率提高 $18\% \sim 25\%$ ；夏季运行模式下，开启排风风机、遮阳卷帘，把热量高的空气导入到室外，避免室内温度上升大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 高层住宅中的 Trombe 墙应用实践

3.1 设计适配性分析

3.1.1 立面整合策略

对于高层建筑来说，其采用Trombe墙时需要做到气候引导式的设计，在北半球情况下要让南立面尽可能得到最大化的敞开，也就是要增加南立面Trombe墙面积以提升冬季获得太阳能的利用率，降低供暖的需求量。另外模块化有利于施工以及拼接，比如把Trombe墙单元模数化(比如做成定尺规格的板)并预制生产，然后与幕墙龙骨系统衔接的话会比较方便快捷，部分研究中提及它的模块化率可达80%以上，这样也可以节省工期。不过需要注意的是，尽管上面提到的被动加热方式都可以做到维持幕墙一体化、节省施工时间的目的，但是最根本的目的还在于做好能源节约工作，这也是它们所共同的作用所在^[7]。

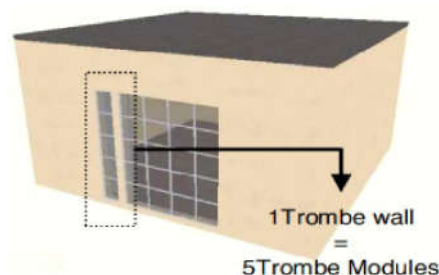


图6 Trombe墙单元标准化

3.1.2 空间冲突与解决方案

(1) 阳台协同设计：法国巴黎Les Jardins de l'Arche项目将Trombe墙嵌入阳台护栏结构(图4)，蓄热体厚度压缩至 150 mm ，在保证阳台进深 $\geq 1.2\text{ m}$ 的前提下，冬季室内温度提升 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；^[10, 21]

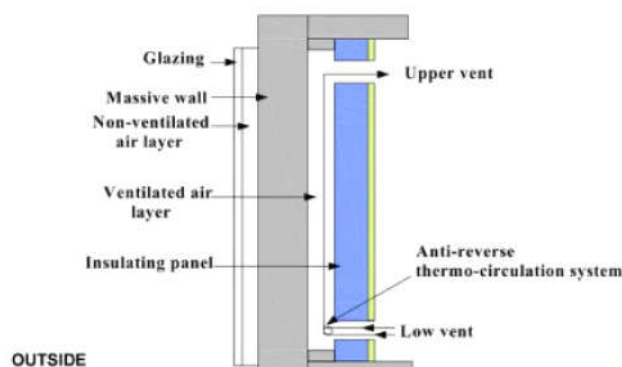


图7 综合式Trombe墙

(2) 阴影干扰规避：把参数化日照模拟工具(Ladybug+Honeybee)运用到深圳某一超高层项目中，并通过参数化手段来调整Trombe墙的间距 $1:1.5$ (即建筑高度与间距比)，将冬至日满足Trombe墙采光时不小于6小时。

3.2 典型案例研究

(1) 案例1：30层住宅(寒冷气候区)

技术配置：复合式PCM-Trombe墙(相变温度

24.5℃)，蓄热层厚度50mm，通风口面积占比6.5%；集成地暖回水余热回收装置（效率 $\geq 75\%$ ）；

能效表现：2021-2022采暖季实测显示，室内平均温度维持在 $20.3\pm 1.5^\circ\text{C}$ ，供暖能耗强度较基准建筑降低35%；连续阴天工况下PCM蓄热衰减率27%，需启动辅助加热（功率密度 $\leq 15\text{W}/\text{m}^2$ ）。

（2）案例2：北欧被动式高层公寓（光伏-TW系统）

系统设计：碲化镉薄膜光伏-Trombe墙（转换效率17.2%），空气流道厚度80mm；轻质陶粒混凝土蓄热墙体密度为 $1450\text{kg}/\text{m}^3$ ，导热系数 $\lambda = 0.45\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；

综合能效：年光伏发电量 $42\text{kWh}/\text{m}^2$ ，补偿建筑20%供暖能耗， CO_2 减排强度 $1.8\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ；低辐照期通过耦合空气源热泵（ $\text{COP} = 2.8$ ）实现补充供能。

（3）失败案例：热带高层住宅过热问题

设计缺陷：马来西亚吉隆坡某28层项目采用传统混凝土Trombe墙（无夏季调控模块）；

实测结果：室内最高温度达到 38.6°C ，超过ASHRAE舒适度阈值 5.1°C ，但由于热压作用产生的反向气流（风速 $0.7\text{m}/\text{s}$ ），不能导致有效的夜间降温（只降低了室内温度的12%）。；

改进措施：强制集成高反射率遮阳（ $\geq 75\%$ 铝制百叶）和机械排风系统（换气次数 $\geq 5\text{次}/\text{h}$ ），并运用CFD模拟进行通风路径优化。

3.3 性能量化研究

3.3.1 热效率关键参数阈值

墙体厚度：混凝土墙体经济性厚度为250-350mm（热效率对数增长 $R^2 = 0.93$ ），而当大于400mm后边际效益每增加50mm下降为0.8%。；

玻璃透光率：可见光透射率每提升10%，日间蓄热速率增加 $1.7\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ，但是为了减少夜间辐射损失（峰值损失降低约41%），因此需要把红外透过率控制到 $\leq 30\%$ ；

通风口尺寸：当占比达到5%-8%，其热压通风效率达到最大值（ $\text{Re} = 1800-2500$ ）；超过10%后，在物理上导致湍流效应的发生，出现热效损失情况（约12%）。

3.3.2 模拟工具应用进展

随着计算能力的提升，动态模拟和流场分析成为Trombe墙研究常用手段。建筑模拟软件（如EnergyPlus、TRNSYS等）常用于热工评估，例如一项对沈阳高层住宅的模拟表明，运用其进行热工性能模拟测试得出，当PCM的熔点设定为 $22-26^\circ\text{C}$ 时，储热效果最好，与实测值偏差小于5%；而CFD是用来分析高层的风压作用影响的。同时利用风洞试验对模型进行调整后，在实际应

用当中发现其实验结果与计算机模拟结果相差仅有个位数，在此情况下能够较好地预测出不同风速条件下高层Trombe墙换热效率及通风流动情况。综合多种手段的应用是目前工程设计不可缺少的一个环节。

5 结论

本文系统总结了Trombe墙在高层住宅中的技术进展与挑战。研究发现，通过相变材料、光伏集成、智能控制等多种手段，高层Trombe墙的储热效率和应用灵活性显著提升。验证了PCM复合、光伏集成与智能通风等手段在提升储热效率、降低采暖能耗（11%-35%）及改善室内热舒适度方面的显著作用；在高层建筑立面设计中，模块化预制与参数化优化手段已被证明有效，可兼顾采光与节能。然而，目前仍存在几个亟待突破的关键难题：一是难以完全通过被动式措施解决夏季过热的问題；二是需要研发适用于高层结构的新型轻质材料；三是因为楼体高度和风力等级相对较高，所以还需开展更为详细地风场分析和分区调控；四是当前仍旧受限于一一定的成本和社会因素导致技术落地进展缓慢。但研究表明，结合BIM参数化设计与示范项目推广，可为Trombe墙在高层住宅领域实现规模化低碳应用提供可行路径。未来工作将聚焦材料性能优化、智能化调控与成本效益评估，以助力建筑节能与绿色发展目标的达成。

参考文献

- [1]Wang D, Hu L, Du H, et al.Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,124:109772-109772.
- [2]刘洋,黄澜,力晓晴,等.热压驱动的中庭建筑自然通风研究[J].工程热物理学报,2021,42(04):986-998.
- [3]S.N,B.S,R.S, et al.Heating and Cooling Application in Energy Efficient Buildings using Trombe Wall: A Review[J].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2021,1130(1):
- [4]Aleksejs P, Anatolijs B, Guna B , et al.A Review on Trombe Wall Technology Feasibility and Applications[J].Sustainability,2023,15(5):3914-3914.
- [5]EnergyPlus™ Version 24.2.0 Documentation Engineering Reference[M]. Engineering Reference
- [6]顾涛,车磊,李念思,等.光热催化百叶型Trombe墙性能的实验探究[J].太阳能学报,2024,45(01):73-79.
- [7]Sara B, Daniel A, Maria G, et al.Building Façade Retrofit with Solar Passive Technologies: A Literature Review[J].Energies,2021,14(6):1774-1774. 1