

热激活建筑系统研究进展

陈萨如拉^{1,2,4}, 常甜馨^{1,2,4}, 杨洋^{3,4*}, 张智⁵, 郭安妮^{1,2}

1. 安徽建筑大学安徽省国土空间规划与生态研究院, 合肥 230601
2. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230601
3. 合肥工业大学建筑与艺术学院, 合肥 230601
4. 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055
5. 安徽安天利信工程管理股份有限公司, 合肥 230071

摘要 基于控制围护结构传热温差而提出的热激活建筑系统(TABS), 可利用注入低品位能源形成热屏障的方式降低建筑负荷, 是实现建筑能碳双控目标的重要措施。提出了TABS分类与评价方法, 从热工性能、集成设计、可持续性和应用潜力等角度对空气基、液体基和固体基TABS进行了梳理与对比分析。现有研究表明: 集成空气基TABS的围护结构当量传热系数小于 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 渗透型还具备热回收与空气净化的双重效果; 液体基TABS在一体化集成和热激活效能方面更具优势, 围护结构当量传热系数可降至 $-3.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 固体基TABS则具有无循环工质、无运动部件和无噪音等优点, 围护结构当量传热系数可降至 $-3.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 但未来需要解决其立面集成和热电模块商业化等问题。

关键词 热激活建筑系统; 围护结构; 分类方法; 性能评价; 传热系数

中国建筑能耗和碳排放的总额中约60%是为满足建筑室内供热制冷等需求过程中产生的^[1-2]。围护结构作为建筑室内热平衡的重要边界, 提升其保温隔热性能是开展建筑能碳双控设计的重要途

径^[3-6]。以往的围护结构保温隔热技术主要以传热系数(K 值)作为核心控制参数, 根据 K 值是否可控制调节, 围护结构保温隔热技术主要被分为静态和动态2类^[7]。目前, K 值恒定的保温材料作为主要

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0200100); 国家自然科学基金项目(52208103); 安徽省自然科学基金项目(2108085QE241, 2208085QE163); 安徽省国土空间规划与生态研究院开放课题(AHJZNX-2021-03); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022-YF062); 中国-葡萄牙文化遗产保护科学“一带一路”联合实验室建开放课题(SDY2102); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金项目(LSKF202303)

作者简介: 陈萨如拉, 讲师, 研究方向为低碳建筑设计及储能技术, 电子信箱: sarul@tju.edu.cn; 杨洋(通信作者), 讲师, 研究方向为绿色建筑设计与技术集成, 电子信箱: yangyang@hfut.edu.cn

引用格式: 陈萨如拉, 常甜馨, 杨洋, 等. 热激活建筑系统研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(22): 55-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.22.006

的静态保温隔热措施已受到广泛应用,但其除了存在安全隐患、占用空间和夏季过热等弊端外,还将直接导致建筑隐含能和碳排放高于自身运行能碳的情况^[8-9]。相比之下, K 值可变的动态保温隔热技术可实现保温和隔热状态的动态切换,从而更大幅度地降低建筑能耗^[10-11]。然而,无论是 K 值恒定还是可变,以围护结构的传热系数为控制参数的保温隔热技术从理论上均无法将围护结构的负荷降低至零,其并非为解决未来建筑能碳双控问题的最佳方案。在此基础上,热激活建筑系统(thermo-activated building system, TABS)作为一种新兴的动态保温隔热技术逐渐受到国内外科研人员的广泛关注与重视^[12-15]。该技术通常将换热系统内置于围护结构中,利用低品位能源的直接注入或可再生能源的间接转化在围护结构内部形成热屏障,从而实现降低围护结构负荷的目的。TABS以围护结构的传热温差为控制参数,突出了自身的能量属性,可将负荷降低至零甚至以下,具有取代建筑制冷供热系统的应用潜力^[16-17]。

目前,关于TABS的研究工作主要集中在理论与应用效果方面,对各类TABS的运行特点及性能对比等尚缺乏系统性综述研究。结合近年来国内外的相关研究成果,提出了TABS的分类与评价方法,从热工性能、集成设计、可持续性和应用潜力等角度对气体基、液体基以及固体基热激活建筑系统进行了梳理和对比分析。

1 分类与评价方法

1.1 系统分类

根据运行工质的不同,TABS分为空气基热激活建筑系统(Air-based TABS, ATABS)、液体基热激活建筑系统(Liquid-based TABS, LTABS)和固体基热激活建筑系统(Solid-based TABS, STABS),如图1所示。ATABS和LTABS主要依靠空气和液体等具有流动特性的循环工质,将低品位热能以热交换的形式直接注入建筑围护结构中。ATABS主要有空气管道式和渗透式2种应用形式;LTABS主要有嵌管式、水膜式和蒸发式3种常见类型;STABS

则需要将能量转换组件(如热电模块)安装在建筑围护结构内,并以能量转换的方式将外部输入的高品位电能间接转换为所需的注入热能,可分为普通热电墙和光伏热电墙2种。

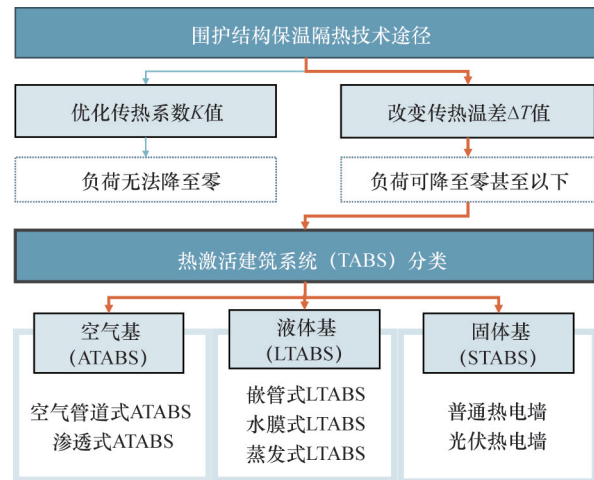


图1 围护结构保温隔热技术途径与热激活建筑系统分类

1.2 性能评价方法

围护结构当量传热系数 K 值是除传热面积以外影响其耗热量的重要因素。因此,本研究通过比较当量 K 值对耦合各项TABS技术的复合墙体热工性能进行了定量对比分析。假设TABS系统结构为混凝土或其他均质材料组成的多层平壁墙体,其当量 K 值计算方法如下:

$$K = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n R_j + R_o} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{K_j} + \frac{1}{\alpha_o} \right]} \quad (1)$$

式中, R_i 、 R_o 为内外表面传热热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; R_j 为第 j 层的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; α_i 、 α_o 为内外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; δ_j 为第 j 层厚度, m ; K_j 为第 j 层传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

此外,还从集成设计、可持续性和应用潜力等方面进行了定性对比分析,并总结了各项技术的优缺点。

2 空气基热激活建筑系统

2.1 空气管道式 ATABS

ATABS 是一种以空气作为循环工质的热激活建筑系统,最初形式是由古罗马人提出的 Murocaust 系统(图2),其可通过高温烟气依次贯穿地板和夹空外墙的方式实现对烟气余热的梯次利用^[18]。随后, Hastings 等^[19]提出一种改进型 Murocaust 系统,该系统利用建筑屋顶作为集热构件并将被加热空气引入围护结构并贯穿室内。性能模拟结果显示,大体量建筑或者小型居住建筑中屋顶集热构件面积与建筑面积比值分别为 0~0.5 和 0~0.2 时,建筑节能能量分别可达 140~1728 MJ/Y·m² 和 180~1980 MJ/Y·m²。尽管 Murocaust 系统在运行过程中存在一定的风机驱动能耗,但其在冬季供暖能耗削减方面比传统 Trombe 墙更具优势。

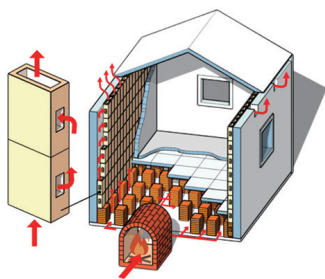


图2 古罗马 Murocaust 系统^[18]

夏季 ATABS 所需冷源可来自于夜间低温空气冷能和地下岩土储存冷能。Zeiler 等^[20]提出了一种将浅层土壤换热器与带有空气流道的夹芯混凝土墙体进行耦合的 Legabeam 系统。Witte 和 Klijnchevalerias 等^[21-22]则提出了一种利用低品位冷源实现墙体均温储能的对流混凝土墙系统,该系统可将面积为 25 m² 的建筑夏季室内平均温度有效降低 2.0℃,但该系统是以夜间低温空气作为冷源,所以通常更加适宜于在夏季昼夜温差较大的地区应用。

此外,利用自然通风或机械通风过程中的余热作为热源来源的通风立面也是一种常见的 ATABS 应用形式。根据通风方向不同,通风立面可分为送风立面和排风立面^[23-24]。Imbabi^[23]对通风立面进行了模拟研究,结果表明,当空气流量达到 1 L/(m²·

s) 时,通风立面可将围护结构 K 值降低 50%。此外, Fantucci 等^[25]在实测研究中发现,排风立面可减少 43%~68% 的热损失,送风立面可实现 9%~20% 的预热效率,而考虑太阳辐射叠加效应后的效率则更高。

2.2 渗透式 ATABS

渗透式 ATABS 又称呼吸墙 (breathing wall, BW)(图3),其可在解决建筑气密性与室内空气流通舒适性矛盾的同时,还可有效降低围护结构热负荷^[26-28]。Wang 等^[29-30]研究发现,当多孔材料厚度为 30~50 mm、空气渗出速率维持在 0.3~0.5 cm/s 时,夏季典型日 BW 的 K 值可低于 0.1 W/(m²·K),而内表面冷负荷可由 8.0 W/m² 降至几乎为零。同时, Dalehaug^[31]研究发现, BW 可回收住宅建筑中约 50% 的热损失。由于冬季室外空气渗入量的增加会引起墙体表面平均辐射温度的下降, Gan^[32]指出可在建筑物外表面额外增加玻璃罩并利用太阳辐射的热提升进风侧空气温度。Craig 等^[33]在 BW 内表面附加一层循环低品位热源的一体化超薄换热器同样可有效提升该类墙体的节能效果与室内热舒适度。

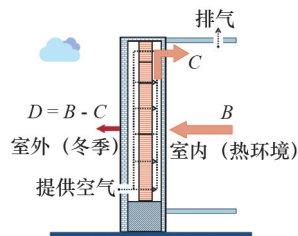


图3 渗透式 ATABS^[23]

2.3 空气基热激活建筑系统对比分析

从表1可看出,应用 ATABS 的墙体当量 K 值可小于 0.3 W/(m²·K),节能效果可达 20~70%。其中, Murocaust 系统可利用烟气余热,但仅适用于冬季。Legabeam 系统和混凝土对流墙体等可起到保温和辅助供能作用,但其需要持续耗费风机驱动能耗且空气携带能量有限,因此热激活效率较低。渗透式 ATABS 可与围护结构一体化集成并应用于既有建筑改造中,同时由于其与室内新风过滤进行了功能耦合,因此还可实现热回收和净化空气的双效功能。然而,呼吸墙内表面温度通常会因热回收而产生

表1 不同 ATABS 技术性能对比分析

类型	建筑集成	可再生能源及低品位能源应用	热源温度/℃	室温/℃	驱动方式	应用效果
空气管道式 ATABS	N	低品位烟气余热	/	/	无	热损失和热舒适度明显改善 ^[18]
	N	低品位太阳能	/	/	V	大型/小型建筑的节能量: 140~1728/180~1980 MJ/Y·m ² ^[19]
	N	环境冷能/浅层地温	环温/浅层地温	24	V	夏季室温平均降 2.0℃ ^[21,22]
	N	建筑热损失/废热	20	20	无	冬/夏季 K: 0.11~0.14 W/m ² ·K/0.25~0.30 W/(m ² ·K), 降(65%~73%)/(28%~35%) ^[23]
渗透式 ATABS	B	建筑热损失/废热	室温	/	V	热回收率 9%~20% 时, 热损失减少率 43%~68% ^[25]
	/	建筑热损失/废热	/	/	V	冬季热损失降幅 50% ^[31]
	B	空调排风	25	25	V	多孔层 50 mm、空气渗透量 3 mm/s 时, K<0.1 W/(m ² ·K), 制冷能耗≈0 ^[29-30]
	N	建筑热损失/废热	室温	/	V	热回收率 50% 时, 冬季室温升高 1.8℃ ^[32]

注:“N”指适用于新建建筑;“B”指同时适用于新建建筑和既有建筑改造;“/”表示未提供相关参数,“V”表示使用风机驱动。

生大幅上升或下降,从而导致室内热舒适性存在下降可能性,同时呼吸墙内多孔呼吸层容易发生堵塞,因此其维护成本也相对较高。

热热阻热容简化模型,提出毛细管墙体稳态换热量分配比例模型以应用于毛细管网墙体的热特性评估研究中,并通过实验验证了该模型的可靠性。

3 液体基热激活建筑系统

3.1 嵌管式 LTABS

嵌管式 LTABS 通常将流体管道一体化嵌入结构层或安装在结构层内外两侧,为防止管道泄露常采用高密度复合管材或经防腐处理的金属管。Krzaczek 等^[34]将 U 型高密度聚乙烯管嵌入外墙结构形成了全年近似恒温的墙体热屏障,可比传统外墙减少至少 3/4 的供暖和制冷能耗,应用在被动房中还可将年供热和通风需求降低至近零。如图 4, Megger 等^[35]提出的主动式低焓地热保温系统在设计温度为 -10℃ 时可减少年电力需求和焓输入约 15%。Zhou 等^[36]模拟研究表明:LTABS 在夏冬两季可分别减少 13% 的冷负荷和 33% 的热负荷;实际应用时其比普通墙体减少了 63% 的热损失,寒冷期最大瞬时降幅可达 81%^[37]。此外, Mikeska 等^[38]研究了内嵌毛细管网的 LTABS,该系统大幅增大了流体管道与嵌管层的接触面积从而提高了整体传热效率,水温与室内温差仅 1~4℃ 时即可满足建筑采暖与制冷需求。秦思宇等^[39]基于非稳态传

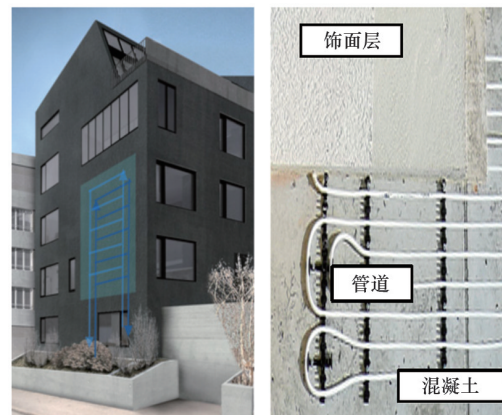


图4 基于嵌管式 LTABS 的建筑围护结构^[35]

相比流量变化,水温、嵌管位置和运行调控对 LTABS 热特性影响更大^[40-42]。Yang 等^[43]对影响 LTABS 的多个因素进行了全局敏感性分析研究,指出嵌管间距对嵌管层内的蓄热影响较大,间距 100~250 mm 时能量密度较佳。为使系统运行过程可与建筑负荷动态变化相匹配,Krzaczek 等^[44]提出了一种模糊逻辑运行控制方法并通过实验进行了验证。Romani 等^[45-46]将 LTABS 与地源热泵进行耦合,采取间歇运行方式提高了系统平均冷却能力和总效率。

除了可利用浅层地热外,LTABS所需低品位能源还可来自冷却塔、空气源热泵和太阳能集热器等^[47-48]。闫帅等^[49]、Shen等^[49-51]利用空气源热泵作为低品位热源并在北京地区进行了实际应用,结果表明该系统可削减84%的内表面传热。

为了能够将LTABS应用于既有建筑节能改造中,Simko等^[52]提出了LTABS预制保温板概念,仅需在外墙上安装预制保温板即可应用。陈萨如拉等^[14,53]提出了热激活相变材料复合墙体,并采用宏观封装的PCM面板替代了普通嵌管夹层,研究表明在中国北方地区墙体热负荷和一次能源消耗可分别减少105.5%和14.07%。此外,Lydon等^[54]将LTABS应用在了一栋具有轻质曲面建筑表皮的生产建筑中,并提出一种基于不同精度模拟和参数化的多功能曲面建筑表皮设计方法,以进一步提高该建筑在全生命周期的能量特性。

针对系统依赖泵送驱动而产生运行能耗的问题,Zhu等^[55]将两相热虹吸回路(Two-phase Thermosyphon Loop, TPTL)应用于TABS,从而提出了基于TPTL的新型TABS系统。该系统可依靠TPTL将低品位热源被动输送到建筑末端从而起到热障或辅助供热作用,技术验证结果表明:TPTL可保持长期稳定注热能力并达到保温隔热和辅助供能等设计目的。Yan等^[56-57]提出了一种夜间辐射冷却散热器耦合管道封装相变材料的墙体系统,模拟结果表明,在夏季开展实验的7 d时间内,新型墙体内部表面的累计传热量与常规墙体相比可降低74.5%。

由于嵌管式LTABS存在一定热堆积现象^[55],而使墙体温度热应力不对称容易对结构造成不可逆损伤。陈萨如拉等^[58-59]提出了一种带有十字钻孔的单/双U型TABS,从而无需进行间歇运行控制即可有效解决传统TABS内部注热能力与墙体热扩散能力不匹配所导致的热堆积现象。该团队还提出了一种模块化TABS^[60](图5),其将换热管置于墙体预留安装腔内并用热扩散性填料填充腔体,在有效缓解墙体内部热堆积的同时可在不破坏墙体结构的条件下完成运行过程中针对性的检修运维等工作,减少了建筑垃圾的产生。

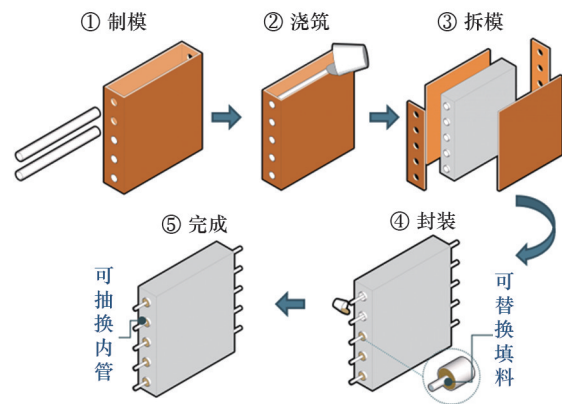


图5 基于嵌管式LTABS的模块化建筑围护结构

此外,杨洋等^[61]提出了一种使用固体颗粒作为循环工质的TABS。该系统使用传热性能较好的鹅卵石和金属球等固体材料作为载热与换热工质并替代现有液体循环工质,从而在确保系统换热效率的同时有效解决TABS面临的泄露、腐蚀与热胀冷缩等技术难题。

3.2 水膜式LTABS

Chow等^[62]提出了一种水膜式LTABS,其直接利用玻璃幕墙作为流体流动通道,实现依靠主动吸收太阳辐射达到降低建筑室内辐射热的目的,该类TABS又被称为水膜窗(图6)。经研究发现,相比同配置下的普通中空双层窗,水膜窗的实验舱温度可下降约40%,同时还可减少建筑所需集热器面积约90.3%^[63]。Li等^[64]提出了应用于双向性气候区的双层水膜窗,其中外层水膜起到太阳能集热器作

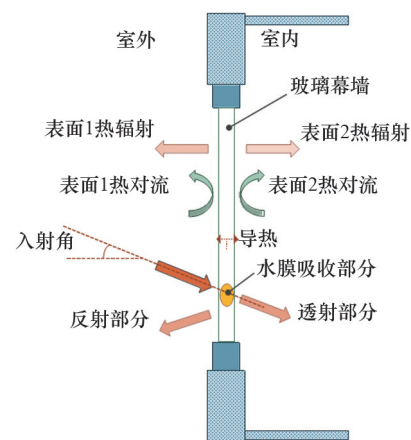


图6 基于水膜式LTABS的建筑围护结构^[62]

用,内层水膜则与浅层地热系统结合以维持室温稳定,内外层水膜之间通过空气间层起到缓冲作用。模拟结果表明,双层水膜窗的集热效率为 21.3%~28.8%,内层水膜的年辅助供热和制冷能力分别达 64.8 和 174.3 kWh/m²。

3.3 蒸发式 LTABS

嵌管式和水膜式 LTABS 均是利用水的显热完成热量迁移过程,而蒸发式 LTABS 则利用水的潜热实现能量迁移^[65]。在图 7 所示的典型蒸发式 LTABS 中,吸湿层被喷雾系统充分润湿后由水分蒸发带走热量并实现降温^[66],该系统在冬季也同样具有良好的保温性能。当该系统与室内连通时,还可为室内提供新鲜湿润的凉爽空气^[67],因此适用于天气较干燥地区。

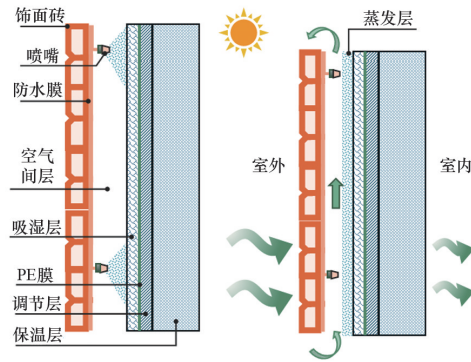


图 7 基于蒸发式 LTABS 的建筑围护结构^[66]

3.4 液体基热激活建筑系统对比分析

从表 2 可看出,针对嵌管式 LTABS 的管道铺设形式与热源温度等参数进行优化后,耦合 LTABS 的墙体当量 K 值可降至 $-3.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,负荷降低

表 2 不同 LTABS 技术性能对比分析

类型	建筑集成	可再生能源及低品位能源应用	热源温度/°C	室温/°C	驱动方式	应用效果
嵌管式 LTABS	N	太阳能+浅层地热	17~20	17~20	P	水温为 17°C, 供热制冷能耗减 3 倍或被动房供热通风能耗 ≈ 0 ^[34]
	B	浅层地热	10	20	P	等同 11 cm 保温, 热泵年电耗降 15% ^[35]
	N	浅层地热	12~23	21/25	P	夏/冬季 K 为 0.15/0.05~0.07 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[37]
	N	/	28±4/15±3	24	P	夏/冬季冷负荷降 13%/33% ^[36]
	B	/	18~24	24	P	夏季峰值冷负荷降幅 98.9%~204.2% ^[42]
	B	/	21~24/18~22	20/26	P	水温升 2°C, 供热能力增 2 倍; 水温降 3°C, 供冷负荷降 60% ^[38]
	N	地源热泵	<40	22~26	P	供暖能耗降 20%~41% ^[45]
	N	地源热泵	20	22~26	P	夏季室内 24/26°C, 制冷能耗增/降 20% ^[46]
	N	太阳能/浅层地热等	湿球温度	26	P	夏季 K 为 $-8.04 \sim 1.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 冷负荷降 61.0%~305% ^[49]
	N	太阳能/浅层地热/冷却塔等	16~26	20	P	冬季水温 20°C, 北京地区 K 为 0.09 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 不同地区 K 为 0.04~1.17 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 热负荷降 78%~84% ^[51]
	N	太阳能/浅层地热/冷却塔等	15~19 19~23	16~18	P	冬/夏季水温 18°C/18~21°C, K 为 0.06/~0.07~0.42 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[47]
	B	太阳能/浅层地热/冷却塔等	20/21	18/26	P	在中国北方地区墙体热负荷/能源消耗减少 105.5%/14.07% ^[14,53]
	N	跨季节储能	29~41	18~24	P	K 为 $-3.69 \sim -0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[54]
	B	太阳能/工厂余废热回收/冷却塔	18~26	21	TPT L	夏/冬季, 水温 26/18°C, 负荷降 79.0%~85.2%/87.0%; 水温进一步降/升, 负荷降低率可大于 100% ^[55]
	N	夜空辐射	湿球温度	26	无	夏季运行 7 d 内表面累计传热比常规墙体降 74.5% ^[56-57]

表2 不同LTABS技术性能对比分析(续表)

类型	建筑集成	可再生能源及低品位能源应用	热源温度/°C	室温/°C	驱动方式	应用效果
水膜式LTABS	B	太阳能/浅层地热等	21	21/25	P	供热/制冷能耗降20.8%/13.1%,全年供热制冷能耗降18.3%,集热器面积降90.3% ^[63]
	B	太阳能/浅层地热等	22.9	20~26	P	冬/夏季辅助供热/供冷能耗为64.8/174.3 kWh/m ² ^[64]
	N	太阳能/湿度差	湿球温度	25~39	P	太阳辐射照度≥200 W/m ² ,室外温度≤40°C时,热舒适性佳 ^[65]
蒸发式LTABS	B	太阳能/湿度差	湿球温度	/	P	室温22~27°C时,降3~6°C,热负荷降3~4 W/m ² ^[66]
	N	湿度差	湿球温度	24.5	P	进口温度45°C时,出口温度最低25.5°C,降19.5°C ^[67]

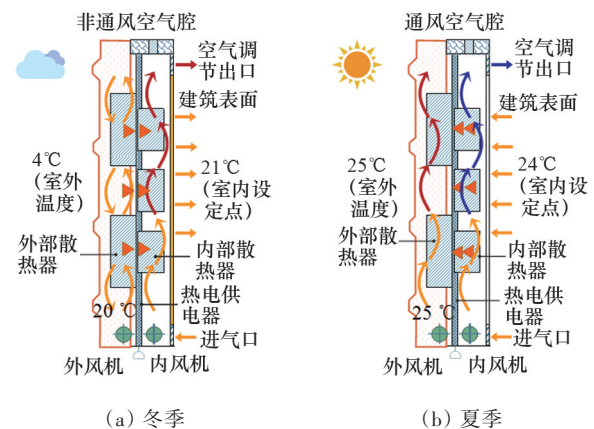
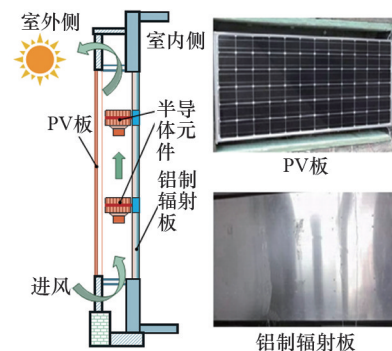
注:“N”指适用于新建建筑;“B”指同时适用于新建建筑和既有建筑改造;“/”表示未提供相关参数;“P”表示使用水泵驱动。

率可达105.5%~305.0%,从而可实现向室内辅助供暖。LTABS技术简单且可实现对低品位能源的高效利用,但该类系统较为依赖泵送系统驱动而存在一定运行能耗,尽管研究者针对热堆积与运维困难等问题已提出了TPTL-TABS、PCM-TABS、十字钻孔型TABS和模块化TABS等系列解决方案,但理论和实践研究尚有待进一步深入展开。水膜式LTABS技术相对简单,还可副产热水,但其存在冬季防冻难题;蒸发式LTABS可将热负荷降低3~4 W/m²,并可与建筑自然通风相结合,但该类系统通常适用于湿度较低的干燥地区,长期使用过程中容易滋生细菌。

4 固体基热激活建筑系统

通过模块化封装方式将热电模块集成在建筑立面中进行室内外环境间的热量迁移和调控的系统称为STABS。该技术解决了ATABS和LTABS高驱动能耗、运行噪音大等劣势^[68]。根据驱动所需电力是否来自光伏发电,STABS可分为光伏热电墙和普通热电墙。图8所示为普通热电墙工作原理,其中通风式主动热电墙墙体中的热电模块可在夏季将室内多余热量传至空腔中并借助自然或机械通风排至室外,冬季热电模块吸收空腔中的太阳热量并传至室内^[69]。由于STABS需消耗电力来控制表面温度,因此Khire等^[70]提出了一种耦合光伏发电

的光伏热电墙,其保温隔热能力与热电模块效率直接相关,而现有热电模块的供热制冷效率范围为0.5~2.5。liu等^[71-72]提出了集热电辐射冷却和光伏发电技术于一体的STABS(图9),其具有利用太阳能控制建筑围护结构热流和降低空调系统需求的综合能力。

图8 通风热电墙^[69]图9 光伏热电墙^[71]

从表3可看出, STABS的热电模块效率范围为0.6~1.8, STABS墙体当量 K 值可降至 $-3\sim-1.2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。相比基于泵送系统驱动的其他类型TABS, STABS由“固体热泵”驱动而不受噪音和振

动问题困扰, 并且可与围护结构进行一体化集成安装, 运行费用较低。但目前针对STABS的研究较少, 技术尚不成熟, 该技术应用效果易受到天气影响, 性能不稳定。

表3 不同STABS技术性能对比分析

类型	建筑集成	可再生能源及低品位能源应用	热源温度/ $^{\circ}\text{C}$	室温/ $^{\circ}\text{C}$	驱动方式	应用效果
普通热电墙	N	/	21/23	21/24~32	V	全年热电模块供能效率为0.66~0.78 ^[69]
	N	太阳能	20	20	无	夏季热电模块供能效率为1.53 ^[70]
光伏热电墙	N	太阳能	16~26	25 \pm 2	V	夏季室温降3~8 $^{\circ}\text{C}$, K 为 $-3\sim-1.2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[71]
	N	太阳能	22~29	20~28	V	夏季冷负荷日降达70%, 瞬时热电模块供能效率为0.7~1.8 ^[72]

注: “N”指适用于新建建筑; “/”表示未提供相关参数; “V”表示使用风机驱动。

5 结论

针对热激活建筑系统领域的国内外研究进展进行了系统综述, 依据系统运行工质的不同将TABS分为ATABS、LTABS和STABS, 并从热工性能、建筑集成、可持续性及应用潜力等方面对不同TABS技术解决方案进行了对比分析。主要结论如下: (1) 在热工性能方面, ATABS的当量 K 值小于 $0.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, LTABS和STABS的当量 K 值分别可降至 -3.6 和 $-3.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; (2) ATABS可与围护结构一体化集成, 并具备利用环境冷能、建筑热损失和空调排风等低品位能源的同时耦合室内新风过滤系统以实现热回收和净化空气的双重功效, 但目前仍需解决其易堵塞和维护成本较高等问题; (3) LTABS可利用太阳能、浅层地热、冷却塔和跨季节储能等多种低品位能源, 嵌管式LTABS则进一步具备技术集约和高能效等优点, 在未来建筑围护结构能碳双控设计与建造中更具应用潜力; (4) STABS中的光伏热电墙主要基于太阳能光电转化驱动并实现预期效果, 可实现建筑一体化集成且具有运行无噪音和运行费用低等优势, 但其仍存在初始投资较高和性能不稳定等问题。

参考文献 (References)

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研

究报告 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 4-15.

[2] 阳栋, 李晃, 李水生, 等. 建筑业减碳途径及实施策略[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 105-110.

[3] 陈平, 孙澄. 近零能耗建筑概念演进、总体策略与技术框架[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 108-116.

[4] 徐伟. 中国近零能耗建筑研究和实践[J]. 科技导报, 2017, 35(10): 38-43.

[5] 周军莉, 童宝龙, 张泉, 等. 建筑开口对自然通风效果及建筑能耗影响模拟分析[J]. 科技导报, 2012, 30(18): 21-26.

[6] 杨柳, 侯立强, 刘江, 等. 围护结构蓄热性能对建筑负荷的影响分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3138-3146.

[7] Yang Y, Chen S. Thermal insulation solutions for opaque envelope of low-energy buildings: A systematic review of methods and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112738.

[8] 周燕, 龚光彩. 基于焓分析和生命周期评价的既有建筑围护结构节能改造[J]. 科技导报, 2010, 28(23): 99-103.

[9] Moretti E, Belloni E, Agosti F, et al. Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization[J]. Applied Energy, 2016, 169: 421-432.

[10] Fang X D, Xia L L. Heating performance investigation of a bidirectional partition fluid thermal diode[J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 679-684.

[11] Koenders S, Loonen R, Hensen J, et al. Investigating the potential of a closed-loop dynamic insulation system for opaque building elements[J]. Energy and Buildings, 2018, 173: 409-427.

[12] 李慧勇, 曲世琳, 冀如, 等. 建筑热激活系统热特性研

- 究[J]. 建筑节能, 2019, 47(6): 22–27.
- [13] 郭海新, 张帆, 晋照华, 等. 恒温动物体温控制机理及建筑围护结构热活性化的探索[C]//2018国际绿色建筑与建筑节能大会论文集, 北京: 中国城市出版社, 2018: 620–628.
- [14] Chen S, Yang Y, Olomi C, et al. Numerical study on the winter thermal performance and energy saving potential of thermo-activated PCM composite wall in existing buildings[J]. *Building Simulation*, 2020, 13(2): 237–256.
- [15] Dharmasastha K, Samuel D, Nagendra S, et al. Thermal comfort of a radiant cooling system in glass fiber reinforced gypsum roof—An experimental study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214: 118842.
- [16] Fawaier M, Bokor B. Dynamic insulation systems of building envelopes: A review[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 270: 112268.
- [17] Krajčůk M, Arıcı M, Šikula O, et al. Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 253: 111476.
- [18] Luo Y Q, Zhang L, Bozlar M, et al. Active building envelope systems toward renewable and sustainable energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 470–491.
- [19] Hastings, Robert S, Mørck O. Solar air systems: A design handbook[M]. London: Earthscan, 2000: 175–185.
- [20] Zeiler W, Boxem G. Geothermal active building concept [M]. Berlin: Springer, 2009: 305–314.
- [21] Witte D, Klijnchevalerias M L, Loonen R C G M, et al. Convective concrete: Additive manufacturing to facilitate activation of thermal mass[J]. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2017, 5(1): 107–117.
- [22] Klijnchevalerias M L, Loonen R C G M, Zarzycka A, et al. Assisting the development of innovative responsive façade elements using building performance simulation [C]//Proceedings of Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design 2017 (SimAUD 2017). Toronto: Simulation Councils, 2017: 243–250.
- [23] Imbabi M S. A passive-active dynamic insulation system for all climates[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, 1(2): 247–258.
- [24] Brown A, Peacock A. Dynamic Insulation: 20130008109A1 [P]. 2013–01–10.
- [25] Fantucci S, Serra V, Perino M, et al. Dynamic insulation systems: experimental analysis on a parietodynamic wall [J]. *Energy Procedia*, 2015, 78: 549–554.
- [26] Alongi A, Angelotti A, Mazzarella L, et al. Experimental validation of a steady periodic analytical model for breathing walls[J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106509.
- [27] Alongi A, Angelotti A, Rizzo A, et al. Measuring the thermal resistance of double and triple layer pneumatic cushions for textile architectures[J]. *Architectural Engineering and Design Management*, 2020, 17(3/4): 334–346.
- [28] Alongi A, Angelotti A, Mazzarella L, et al. Measuring a breathing wall's effectiveness and dynamic behaviour[J]. *Indoor and Built Environment*, 2019, 29(6): 783–792.
- [29] Wang J B, Du Q Z, Zhang C, et al. Mechanism and preliminary performance analysis of exhaust air insulation for building envelope wall[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 173: 516–529.
- [30] Zhang C, Gang W J, Xu X H, et al. Modelling, experimental test, and design of an active air permeable wall by utilizing the low-grade exhaust air[J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 730–743.
- [31] Dalehaug A. Development and survey of a wall construction using dynamic insulation[C]//Proceedings of the 3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Copenhagen: Building Physics, 1993: 219–226.
- [32] Gan G. Numerical evaluation of thermal comfort in rooms with dynamic insulation[J]. *Building and Environment*, 2000, 35(5): 445–453.
- [33] Craig S, Grinham J. Breathing walls: The design of porous materials for heat exchange and decentralized ventilation[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 149: 246–259.
- [34] Krzaczek M, Kowalczyk Z. Thermal Barrier as a technique of indirect heating and cooling for residential buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4): 823–837.
- [35] Meggers F, Baldini L, Leibundgut H, et al. An innovative use of renewable ground heat for insulation in low exergy building systems[J]. *Energies*, 2012, 5(8): 3149–3166.
- [36] Zhou L, Li C. Study on thermal and energy-saving performances of pipe-embedded wall utilizing low-grade energy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115477.
- [37] Kisilewicz T, Fedorczakcisak M, Barkanyi T, et al. Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 205: 109541.
- [38] Mikeska T, Svendsen S. Study of thermal performance of

- capillary micro tubes integrated into the building sandwich element made of high performance concrete[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 52(2): 576–584.
- [39] 秦思宇, 王宇昂, 李扬, 等. 采用稳态模型的毛细管墙体热工特性研究[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(5): 142–148.
- [40] 陈尚斐, 隋学敏. 不同冷辐射表面位置对内嵌管式围护结构供冷房间负荷的影响[J]. *制冷与空调*, 2020, 34(1): 86–90.
- [41] Niu F, Yu Y. Location and optimization analysis of capillary tube network embedded in active tuning building wall[J]. *Energy*, 2016, 97: 36–45.
- [42] Yu Y B, Niu F X, Guo H, et al. A thermo-activated wall for load reduction and supplementary cooling with free to low-cost thermal water[J]. *Energy*, 2016, 99: 250–265.
- [43] Yang Y, Chen S, Chang T X, et al. Uncertainty and global sensitivity analysis on thermal performances of pipe-embedded building envelope in the heating season[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114509.
- [44] Krzaczek M, Florczuk J, Tejchman J, et al. Improved energy management technique in pipe-embedded wall heating/cooling system in residential buildings[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113711.
- [45] Romani J, Cabeza L F, Perez G, et al. Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall[J]. *Renewable Energy*, 2018, 116: 1–8.
- [46] Romani J, Belusko M, Alemu A, et al. Optimization of deterministic controls for a cooling radiant wall coupled to a PV array[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 1103–1110.
- [47] Zhu Q, Xu X, Wang J, et al. Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 76: 258–272.
- [48] 朱求源, 徐新华. 内嵌管式围护结构的频域热特性[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(11): 64–67.
- [49] 闫帅, 沈翀, 李先庭, 等. 嵌管式窗户全年动态性能预测方法[J]. *暖通空调*, 2018, 48(2): 18–23.
- [50] Shen C, Li X T. Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing low-temperature hot water in the heating season[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 318–331.
- [51] Shen C, Li X T. Dynamic thermal performance of pipe-embedded building envelope utilizing evaporative cooling water in the cooling season[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 1103–1113.
- [52] Simko M, Krajcik M, Sikula O, et al. Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical simulations and experiments[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 135–146.
- [53] 陈萨如拉, 常甜馨, 杨洋, 等. 既有建筑嵌管式相变复合墙体夏季热特性研究(英文)[J]. *中国科学技术大学学报*, 2021, 51(11): 840–856.
- [54] Lydon G P, Caranovic S, Hischier I, et al. Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 202: 109208.
- [55] Zhu L, Yang Y, Chen S, et al. Thermal performances study on a façade-built-in two-phase thermosyphon loop for passive thermo-activated building system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 112059.
- [56] Yan T, Gao J J, Xu X H, et al. Dynamic simplified PCM models for the pipe-encapsulated PCM wall system for self-activated heat removal[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 144: 27–41.
- [57] Yan T, Sun Z W, Gao J J, et al. Simulation study of a pipe-encapsulated PCM wall system with self-activated heat removal by nocturnal sky radiation[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 1451–1464.
- [58] 陈萨如拉, 常甜馨, 潘超, 等. 带有十字钻孔的双U型热激活建筑围护结构: CN214620769U[P]. 2021-11-05.
- [59] 陈萨如拉, 常甜馨, 潘超, 等. 带有旋转钻孔的单U型热激活建筑围护结构: CN214619894U[P]. 2021-11-05.
- [60] 律宝莹, 杨洋, 陈萨如拉. 一种模块化墙体围护结构: CN210086549U[P]. 2020-02-18.
- [61] 杨洋, 聂玮, 陈萨如拉, 等. 固体基热激活建筑外围护结构: CN112944432A[P]. 2021-06-11.
- [62] Chow T, Li C Y, Lin Z, et al. Innovative solar windows for cooling-demand climate[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(2): 212–220.
- [63] Gil-lopez T, Gimenezmolina C. Influence of double glazing with a circulating water chamber on the thermal energy savings in buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 56: 56–65.
- [64] Li C Y, Tang H D. Evaluation on year-round performance of double-circulation water-flow window[J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 176–190.
- [65] Maerefat M, Haghighi A P. Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(9): 2040–2052.

- [66] Naticchia B, Dorazio M, Carbonari A, et al. Energy performance evaluation of a novel evaporative cooling technique[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(10): 1926–1938.
- [67] Alaidroos A, Krarti M. Numerical modeling of ventilated wall cavities with spray evaporative cooling system[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 130: 350–365.
- [68] Prieto A, Knaack U, Auer T, et al. COOLFACADE: State-of-the-art review and evaluation of solar cooling technologies on their potential for façade integration[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 395–414.
- [69] Ibanezpuyp M, Martingomez C, Bermejjobusto J, et al. Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE): Analysis of its energy performance when integrated in a building[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1586–1592.
- [70] Khire R, Messac A, Van Dessel S, et al. Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(19): 4028–4040.
- [71] Liu Z B, Zhang L, Gong G C, et al. Experimental evaluation of an active solar thermoelectric radiant wall system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 94: 253–260.
- [72] Luo Y Q, Zhang L, Liu Z B, et al. Numerical evaluation on energy saving potential of a solar photovoltaic thermoelectric radiant wall system in cooling dominant climates [J]. *Energy*, 2018, 142: 384–399.

Research progress on thermo-activated building system

CHEN Sarula^{1,2,4}, CHANG Tianxin^{1,2,4}, YANG Yang^{3,4*}, ZHANG Zhi⁵, GUO Anni^{1,2}

1. Anhui Institute of Territorial Space Planning and Ecology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China
2. School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China
3. College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China
4. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China
5. Anhui AHTECH Lixin Engineering Management Co., Ltd., Hefei 230071, China

Abstract The thermo-activated building system (TABS), which is considered to be an important measure to achieve the goal of dual control of energy and carbon in buildings, can reduce the building load by injecting low-grade energy to form a thermal barrier. The proposed system is based on controlling the heat transfer temperature difference of the envelope. This paper presents the classification and evaluation methods of TABS, and systematically compares and analyzes air-based, liquid-based and solid-based TABS from the perspectives of thermal performance, integrated design, sustainability and application potential. Existing studies show that the equivalent heat transfer coefficient of the envelope integrated with air-based TABS is less than $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Permeable air-based TABS also has the dual effect of heat recovery and air purification; Liquid-based TABS is more advantageous in terms of integration and operational energy efficiency, with an equivalent heat transfer coefficient of the envelope down to $-3.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Solid-based TABS has the advantages of no working fluid, no moving parts and no noise, and its envelope equivalent heat transfer coefficient can be reduced to $-3.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. However, issues such as its façade integration and commercialization of thermoelectric modules need to be addressed in the future.

Keywords thermo-activated building system; building envelope; classification method; performance evaluation; heat transfer coefficient ●



(责任编辑 卫夏雯)