

建筑相变蓄热及夜间通风技术研究进展

杨柳^{1,2}, 乔宇豪^{1,2}, 刘衍^{1,2*}, 侯立强^{1,2}, 王梦媛^{1,2}, 刘加平^{1,2}

1. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055;

2. 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055

* 联系人, E-mail: liuyan@xauat.edu.cn

2017-07-20 收稿, 2017-12-30 修回, 2018-01-17 接受, 2018-03-01 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51325803)、陕西省自然科学基金(2017JQ5005)和西部绿色建筑国家重点实验室(培育基地)开放研究基金(LSKF201704)资助

摘要 被动式建筑节能策略通过提升建筑物自身性能及充分利用自然能源来营造舒适的室内热环境, 是实现建筑可持续发展的有力途径。相变蓄热技术及夜间通风技术是被动式建筑节能的有效措施, 两者有机结合的复合降温技术更能显著改善夏季建筑物室内热环境, 降低空调制冷能耗。该技术在利用相变蓄热大幅提升建筑物热稳定性的同时, 充分利用了夜间通风携带的自然冷量资源, 达到了节能和舒适性并举。通过对相变蓄热、夜间通风以及二者复合降温技术主要研究领域文献的深入调研, 从技术原理、实验研究、节能降温效果等方面对该技术的研究现状进行了分析, 综述了相变蓄热及夜间通风技术的研究进展。分析表明, 合理应用相变蓄热结合夜间通风复合降温技术可以获得舒适的夏季室内热环境, 有效节约空调制冷能耗。通过综合分析该复合降温技术各构成要素之间的相互影响关系, 指出该技术应用方式多样, 需要综合考虑到气候条件、相变蓄热使用方式以及夜间通风策略等诸多因素。最后, 对该技术的复合降温机理及热工设计策略的进一步研究做出了展望。

关键词 建筑节能, 建筑热工, 相变蓄热, 夜间通风, 复合降温技术

现代建筑建立在高度工业化基础之上, 往往呈现出高能耗、高污染的问题, 这会对我国的能源节约和经济可持续发展造成不利影响, 被动式低能耗建筑设计被视为解决建筑高能耗问题的有力途径^[1]。被动式建筑设计是指合理采用建筑设计策略、充分利用自然冷热量资源, 在保证使用需求的前提下大幅度降低建筑设备能耗的建筑设计策略^[2]。常见的被动式设计思路有以下两种: (1) 提高建筑物自身对不利室外条件的抵抗能力; (2) 充分利用自然气候产生的冷热量资源。建筑蓄热及夜间通风技术是对上述两种被动式设计思路的良好应用。其中, 建筑蓄热作为一种普遍的建筑节能措施, 可以转移冷负荷, 稳定室内温度波动。建筑蓄热分为传统的显热蓄热和潜热蓄

热(又称相变蓄热)两种方式, 其中潜热蓄热体(相变材料)应用于建筑可显著提高建筑物蓄热能力^[3]。和同等数量显热蓄热体的蓄热能力相比, 相变材料的蓄热能力提升显著。同时, 周期循环的相变过程可以有效调控室内温度的时空分布, 起到对冷负荷的“削峰填谷”作用。因此, 相变蓄热作为一种有效的建筑节能手段, 可以削减室内温度波动, 转移能量需求的峰值负载, 同时提供舒适的室内热环境, 从而降低空调能耗^[4]。

传统的被动式降温措施还体现在对夜间低温空气的利用方面。利用大量夜间凉风降低室内空气和建筑围护结构的温度是一种非常有效的被动式降温措施, 这种降温措施被称为夜间通风降温技术^[5]。传

引用格式: 杨柳, 乔宇豪, 刘衍, 等. 建筑相变蓄热及夜间通风技术研究进展. 科学通报, 2018, 63: 629–640

Yang L, Qiao Y H, Liu Y, et al. Review of phase change heat storage and night ventilation technology of buildings (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 629–640, doi: 10.1360/N972017-00788

统夜间通风降温技术利用夜间低温空气通过如墙体、地板、家具等显热蓄热体进行冷量的蓄存,但是显热蓄热体存在蓄热能力有限、调控范围不足、占用有效建筑面积过大等缺点.相变蓄热弥补了传统显热蓄热的不足,通过相变吸放热过程结合夜间通风对冷量进行大量、高效蓄存,并在白天最炎热的时间段向室内释放冷量,能够有效改善室内热环境,节约夏季空调制冷能耗^[6].因此,相变蓄热结合夜间通风的复合降温技术是一种更为理想的夏季室内热环境调控策略.

综上所述,相变蓄热结合夜间通风复合降温技术是一种具有良好前景的被动式节能技术.该技术的核心内容包含两个基本问题和一个关键设计目标,其中两个基本问题包括:(1)如何在建筑中实现相变蓄热中热量的高效蓄存和释放;(2)如何使建筑物对夜间通风携带的自然冷量进行高效利用.关键设计目标就是通过对相变蓄热与夜间通风各参数的精确设计匹配,实现夜间通风和相变蓄热的协同强化,调控相变材料的蓄放热过程,达到对建筑物所需冷热量的定量调控,进而使建筑物实现舒适节能的目标.

针对上述问题,本文通过深入文献调研,综述了国内外相关领域研究进展,并对日后的研究工作进行了展望.

1 被动式相变蓄热技术研究进展

建筑物的基本功能之一在于抵抗外界的不利温度波动,营造稳定宜居的室内环境,其蓄热能力是其抵抗温度波动的关键.传统建筑往往采用重质围护结构或大量蓄热体来提高其显热蓄热能力,该方式存在诸多缺陷,如容易在冬季寒冷期蓄存过多冷量、占用有效建筑面积过大等.随着时代发展,近年来又兴起了轻质围护结构建筑,这种建筑蓄热能力更差,需要空调等设备通过消耗大量能源来维持舒适的室内环境.相变蓄热的应用能够很好地解决上述问题,相变蓄热的储热密度大,可以根据气候和使用需求在特定温度段进行热量的高效蓄存而不影响其他温度范围的蓄热能力,满足了夏季抵抗室外周期性温度波动的同时有效规避了重质围护在冬季产生的不利影响,同时易与轻质围护结构进行良好结合.Kuznik等人^[7,8]研究发现,结合相变材料的轻质墙体能够有效抑制室内气温波动,降低室内过热温度,同时能够增强室内空气的自然对流,避免传统室内环

境中的热分层现象,提高室内环境的舒适度.

通过上述研究可见,相变蓄热技术具有传统建筑显热蓄热所不能比拟的优势.但是,相变蓄热和建筑之间需要通过良好的结合才能充分发挥其应有的蓄热潜力.在与建筑结合的过程中,需要考虑到相变材料的选用、封装形式、热物理性质等问题,主要体现在以下3个方面.

1.1 建筑用相变材料的类型及封装形式

选择合适的相变材料是应用相变蓄热技术的首要前提,选用时需要充分考虑其类型与性能因素.文献^[9,10]对建筑中常用的不同种类相变材料进行了综述,指出目前应用于建筑节能中的相变材料主要分为3类:有机、无机以及共熔物相变材料,其中应用较为广泛的是石蜡及脂肪酸等有机相变材料.常见的相变材料分类如图1所示.

建筑中所采用的相变材料多为固-液相变材料,防止其液相状态下的泄漏是其应用于建筑的必然要求.泄漏的相变材料不仅会影响其蓄热效果,也会破坏腐蚀原有建筑结构,对建筑直接造成损害.因此,需要对相变材料进行合适封装.目前常用的封装方式包括直接混合、宏观封装、微观封装以及定型相变材料等^[11].其中,直接混合的封装形式在早期相关研究中曾被采用,如Feldman等人^[12]将硬脂酸丁酯掺混在石膏板中,大幅提高了其蓄热性能.但由于直接混合方式极易产生相变材料泄漏,已不被建筑节能所普遍采用.而其余3种封装形式则多见于现今研究者的研究中,如Shi等人^[13]和Cui等人^[14]利用钢球宏观封装正十八烷相变材料并将其填充在混凝土中进

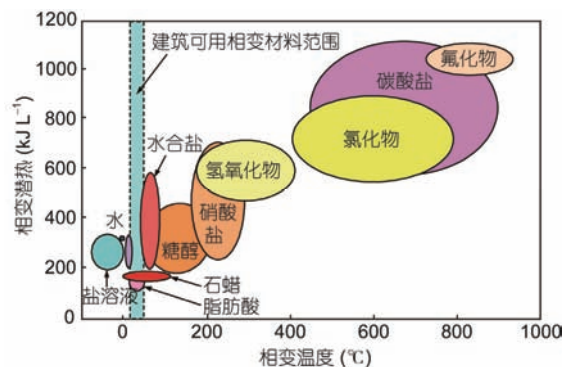


图1 (网络版彩色)常见相变材料分类^[9]

Figure 1 (Color online) Classification of common phase change material^[9]

行应用; Schossig等人^[15]研制了一种石膏基微观封装相变材料; Lin等人^[16]开发了一种以聚乙烯为支撑材料的定型相变材料. 图2列举了部分常见的相变材料封装形式.

对于相变材料进行合适的封装不仅为了避免相变材料泄漏, 也需要考虑封装体对于相变材料传热、结构等方面的影响, 以及注意到相变材料是否会和封装体产生化学反应, 造成腐蚀. 良好的相变材料封装体应当具有较好的传热性能、一定的结构强度以及优秀的耐久性, 以便应用到建筑围护结构中.

1.2 建筑用相变材料的热物理性质

相变过程的蓄放热性能与相变材料的热物理性质息息相关, 如相变温度范围、相变潜热量、相变材料的导热系数等. 相变温度范围需要根据建筑所处的环境温度变化范围确定; 相变潜热量决定了相变蓄热技术的蓄热能力; 而相变材料的导热系数则决定了热量通过相变材料的难易程度, 关乎到相变蓄热效果的发挥. 目前常见的相变材料往往导热系数较小, 且存在过冷现象等, 不利于相变过程的进行, 需要对其进行进一步优化. 文献[17]对常用的相变材料热物理性质测试方式进行了综述, 主要包括差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC), T-history方法、水浴法以及差热分析法等. 通过测试充分了解相变材料的热物理性质是应用相变蓄热的前提.

传统的相变材料传热性能较差, 为了使其更好地增强建筑蓄热能力, 许多研究者对其传热性能进行了强化, 常见的方式是加入石墨等添加成分. Lachheb等人^[18]对比研究了两种不同石墨加入到石蜡相变材料后对其传热性能的改善情况, 结果表明添加石墨后相变材料的导热性能和热扩散率都有了显著

提升. Ye等人^[19]则利用膨胀石墨强化了 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相变材料的传热性能, 收获了良好的效果. Hussain等人^[20]利用活性炭纳米片作为成核剂添加在油酸和癸酸的相变材料中, 显著提升了该相变材料的导热性能.

相变材料的过冷现象和自然对流性质对其性能发挥具有显著影响. 过冷是指相变材料在降温过程中, 温度低于凝固点, 材料仍未固化的现象; 自然对流是指相变材料在液化过程及液相状态下, 由于温度梯度的存在而自发产生液态材料对流的现象. 过冷现象对于相变周期的顺利进行具有不利影响, 而自然对流往往会对相变材料传热性能产生强化. Sun等人^[21]对相变材料的自然对流现象开展了研究, 发现自然对流引起的传热强化有利于相变过程的进行——同比缩短了45%的相变时间. Soares等人^[22]通过加热/冷却实验, 探索了不同封装形式下自然对流及过冷现象对相变材料传热特性的影响. 实验发现, 对于宏观封装的相变材料, 自然对流及过冷现象对于其传热特性有较大影响, 而微观封装下的相变材料则可以忽略这些性质带来的影响.

通过以上分析可以看出, 无论是相变材料的种类、封装形式或是热物理性质, 对建筑相变蓄热的应用都有显著影响. 因此, 在相变蓄热技术应用于建筑之前就需要对所选用的材料进行充分考虑, 使得建筑相变蓄热技术能够发挥出理想的效果.

1.3 建筑相变蓄热实验研究

相变蓄热应用于建筑中时, 会受到诸多因素的影响. Bontemps等人^[23]探索了实际气候条件下不同相变温度的相变材料对于实验小室内空气温度的影响, 对比了3种不同相变温度的相变材料对实验小室

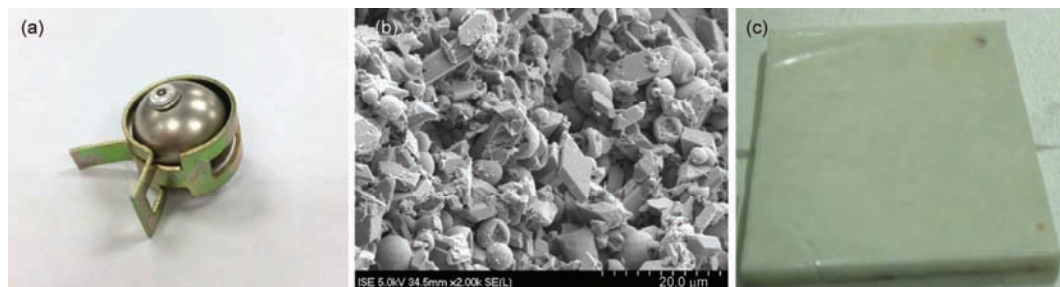


图2 (网络版彩色)相变材料的封装形式. (a) 宏观封装^[13,14]; (b) 微观封装^[15]; (c) 定型相变材料^[16]

Figure 2 (Color online) Phase change material encapsulation form. (a) Macro-encapsulated phase change material^[13,14]; (b) micro-encapsulated phase change material^[15]; (c) shape-stabilized phase change material^[16]

内环境的降温效果,指出在应用相变蓄热技术进行夏季降温时,可以通过对夜间通风的有效利用和限制入射太阳辐射以达到更优化的效果。

相变材料层在围护结构中的布置位置是影响相变蓄热性能的重要因素, Jin等人^[24,25]和Lee等人^[26]对此开展了一系列研究. Jin等人^[24,25]搭建了一个“动态墙体模拟装置”,通过对比实验探索了相变材料层在墙体不同位置的影响,结果表明相变材料放置在墙体远热源侧 $1/5L$ 处(L 为墙体厚度)的效果最好. 通过与没有应用相变材料的对比组相比,该设置方式可以降低热流峰值高达41%,增加传热延迟约2 h. 通过利用差示扫描量热法对相变过程进行监测,指出相变材料层的优化布置位置与相变材料所处温度条件相关——墙体中适宜位置布置的相变材料的相变温度范围和所处位置的温度变化区间有较大重叠,更加有利于相变周期的循环进行. 针对同样的位置优化问题, Lee等人^[26]在室外条件搭建了对比测试房间进行了对比实验. 图3展示了相关实验研究装置。

相变材料蓄热密度大,具有多种灵活的应用方式,许多研究者通过建立相应实验设施进行了研究. 例如, Ahmad等人^[27]探究了相变蓄热应用于轻质围护结构房间的效果, Chen等人^[28]研究了相变蓄热对温室大棚的提升效果, Long等人^[29]则针对 VO_2 (二氧化钒)相变镀膜玻璃和相变不透明围护结构的协同应用展开了研究. 图4列举了部分相变蓄热技术的实验研究案例。

相变蓄热技术能够有效节约建筑运行能耗. 位于德国的Fraunhofer ISE机构较早地开展了相变蓄热技术的节能应用示范^[15],在示范建筑中应用相变蓄热技术的同时结合了夜间通风和遮阳等被动式措施. 实际运行中的建筑热环境测试表明,结合夜间通风

的相变蓄热技术能够在白天降低室内温度达 3°C ,而结合了夜间通风和遮阳系统后,室内超过 26°C 的过热时间有明显的缩短. Akeiber等人^[30]将宏观封装的石蜡相变材料布置在位于炎热地区(伊拉克)的房间的侧墙及屋顶上方,整体建筑利用空调控制在 24°C . 与没有采用相变材料的对比房间相比,其空调能耗从 7.92 kW h 降低到了 4.356 kW h ,相比节省了45%的电力消耗。

现有研究证实,相变蓄热技术能够显著增强建筑物蓄热能力,提高室内温度的稳定性. 然而,相变蓄热技术的单独应用在夏季降温节能方面仍有不足,白天蓄积的大量热量会在夜间温度较低时释放,提高了夜间室内温度的同时也不利于相变周期的完整进行,从而对第二天白天的蓄热能力产生不利影响. 其中, Barzin等人^[31]通过实测证明,单纯在夏季使用相变蓄热策略甚至会增加建筑所需制冷能耗. 如何合理利用自然冷量资源,让相变蓄热在改善夏季室内热环境中更好的发挥呢? 考虑到我国西部大部分地区昼夜温差较大的大陆性气候特点,利用夏季夜

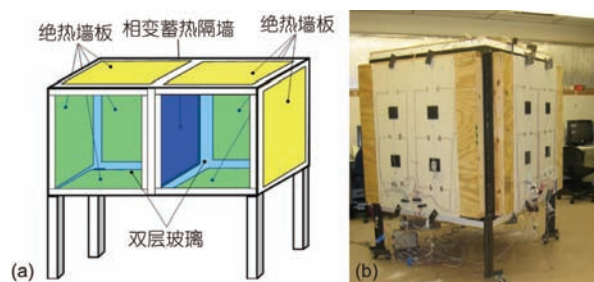


图3 (网络版彩色)相变蓄热的影响因素实验. (a) 相变温度影响^[23]; (b) 相变材料位置影响^[24,25]

Figure 3 (Color online) Experiment on influencing factors of phase change heat storage. (a) Phase change temperature^[23]; (b) location of phase change material^[24,25]

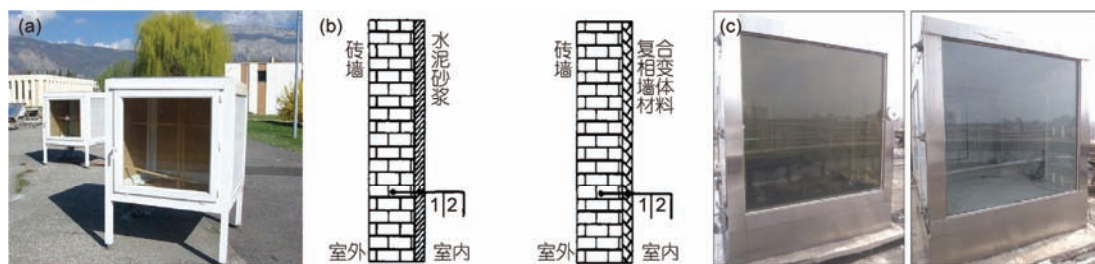


图4 (网络版彩色)建筑相变蓄热实验研究. (a) 相变材料结合轻质房间^[27]; (b) 相变蓄热结合温室大棚^[28]; (c) 相变蓄热结合 VO_2 玻璃^[29]

Figure 4 (Color online) Experimental study of phase change heat storage on buildings. (a) Combined with lightweight building^[27]; (b) combined with greenhouse^[28]; (c) combined with VO_2 window^[29]

间的凉空气进行通风是很有潜力的选择。

2 夜间通风技术研究进展

在被动式低能耗建筑设计中,合理利用自然产生的冷热量是一种必要的手段,利用夏季夜间的凉空气进行通风,结合蓄热体进行蓄冷来进行降温,可以大幅减少建筑夏季制冷设备能耗,是一种有效的被动式节能措施^[1]。这种策略通常称之为夜间通风技术,以下为其主要研究内容。

2.1 夜间通风的气候适宜性

采用夜间通风技术时,必要的前提条件是夏季室外夜间空气温度能够满足降温要求。面对不同地域的气候条件存在很大差异的特点,Givoni^[32]提出了利用生物气候图来分析夜间通风适用性的方法,并得到了早期研究的广泛采用。Artmann等人^[33]提出了通风降温潜力(climatic cooling potential, CCP)的概念,是一种能够描述夜间通风降温潜力的新方法。CCP基于当地气候条件,反映了该气候条件下昼夜温差的大小以及其全年累计的程度,可以客观地表征当地气候条件下利用夜间通风进行降温的能力。西安建筑科技大学的杨柳^[2]基于我国不同地域气候特征,分析了我国适宜夜间通风技术的地区,并给出了相应的被动式设计方法。根据CCP的计算结果,我国大部分地区都处于适宜采用夜间通风降温策略的范围内^[1]。元晓琳等人^[34,35]提出了一种针对我国北方城市的夜间通风建筑热工设计方法,并基于CCP指标对我国蓄热通风降温设计进行了分区,为我国采用夜间蓄热通风的建筑设计的方案阶段提供了有效的科学参考。

2.2 夜间通风热工设计方法

将夜间室外凉空气直接引入室内进行降温是夜间通风最为直接的应用方式,所采用的通风策略是其关键影响因素,主要包括通风形式、通风量、通风空气温度等。针对不同的通风形式,Artmann等人^[36]搭建了一个全尺寸实验房间用以对比研究置换通风和混合通风两种夜间通风模式,开发了一种可以应用于建筑设计初期估算夜间通风制冷性能的图表。Dréau等人^[37]在此基础上进行了多种工况的实验,对比了不同因素对夜间通风效果的影响情况,包括不同的通风方式(混合通风/置换通风)、通风换气次数、

进出风口温度差及地板辐射率等。应用夜间通风技术时,若能根据气候条件、建筑所处具体环境及建筑物自身特性等,对通风换气速率、通风温度、通风时间段等进行精准控制,必然有助于获得更好的通风降温效果。

2.3 夜间通风结合建筑显热蓄热

为了满足利用夜间通风改善全天候室内热环境的目的,往往将其结合建筑蓄热以蓄存夜间冷量。显热蓄热作为建筑中最为常见的蓄热技术,被人们广泛采用。香港大学的Yang和Li^[38]研究了显热蓄热量和夜间通风对建筑物制冷负荷降低的影响,指出气候条件一定的情况下,只有合适的蓄热量才能够达到理想的效果。朱新荣等人^[39]以西安地区既有办公建筑为研究对象,研究了显热蓄热和夜间通风的共同作用对建筑室内热环境的影响。通过设置对比房间进行实验研究,证明了西安地区在应用夜间通风技术后对于室内热舒适环境具有明显的改善,并利用EnergyPlus软件对夜间通风建筑中的各项参数进行了优化分析,提出了通风量和显热蓄热量之间的匹配关系^[40]。同时,基于相关研究,刘加平等人^[41]开发了一种用于建筑物夜间通风降温设计的简化计算方法,为日后相变蓄热通风设计策略提供了先期理论支撑。

夏季夜间通风降温技术是一种理想的、适用于我国气候条件的被动式降温策略。然而,夜间通风结合显热蓄热的传统应用模式对夜间通风冷量的利用不够充分,存在蓄热效率较低、温度调控能力不足等缺点。结合相变蓄热则可以弥补以上不足,通过相变周期的进行,能够有效调控热量分布,达到充分利用夜间冷量进行被动式降温的目的。

3 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术研究进展

相变蓄热技术体现了被动式设计中提高建筑物对不利室外条件抵抗能力的思路,夜间通风技术则体现了被动式设计合理利用自然冷热量资源的思路。然而,无论是单独利用相变蓄热或是夜间通风技术,在调控室内热环境、降低夏季制冷能耗方面,都存在一定的局限性:相变蓄热技术能够有效调控建筑物全天候热量分布,但是无法进行有效降温;夜间通风可以在夜间通风时段进行有效降温,却无法全天候

调控建筑内环境. 因此, 将两者进行优势互补的相变蓄热结合夜间通风复合降温技术能够弥补两者单独采用时的不足, 在大幅增强了建筑物自身对热量调控能力的同时充分地利用自然冷量资源, 是一种综合体现了被动式节能思路的建筑节能措施. 该技术作用原理为: 夜间通风时段通过相变放热过程蓄存通风携带的自然冷量; 白天炎热时段关闭门窗, 通过相变吸热过程将蓄存的冷量向室内环境释放. 该技术应用于建筑物中能够有效防止室内环境过热, 充分利用夜间自然冷量资源, 节约夏季制冷能耗, 是一种新兴的复合被动式降温策略. 其作用原理及调控目标如图5所示.

3.1 通风对相变材料传热性能的强化机理

建筑中应用相变材料需要克服其传热性能较弱的缺陷, 较弱的传热性能会导致相变过程缓慢, 限制相变蓄热能力. 现有研究证实, 增强相变材料表面的空气对流对其传热性能具有强化作用, 通风可以有效增强相变材料表面的对流换热, 加速相变过程, 缩短相变过程完成的周期^[42]. 此外, 利用夜间携带有

自然冷量的凉空气进行通风, 不仅可以加速相变蓄热体的相变过程, 还能够使相变材料有效地蓄存夜间通风的冷量, 进一步强化其控温效果.

Zalba等人^[43]研究了相变蓄热结合夜间通风过程中, 各项因素对于相变蓄放热过程的影响. 对于固化过程, 相变材料的封装厚度、通风空气温度、空气流速等具有显著影响; 而对于熔化过程, 主要的影响因素在于通风过程的空气温度. Perino等人^[44]探究了相变蓄热系统在结合通风过程中的蓄放热特性, 通过在不同空气流速和温度下进行对比实验, 探究了相变蓄热系统蓄放热特性的影响因素, 并建立了有限差分模型和实验结果进行相互印证. Xie等人^[42]提出利用机械通风增强相变墙体蓄放热效果的思路, 并且搭建了可以精确控制通风气流速度和温度的实验装置进行验证. 实验结果指出, 提高空气温度和通风气流速度可以增强相变墙体的传热性能, 缩短相变周期. 在控制气流速度固定为1 m/s的条件下, 将通风温度上限从34℃提高到40℃, 相变完成时间缩短了1.3 h; 在控制通风过程中温度范围不变的条件下, 将气流流速从1 m/s提高到2.5 m/s, 热通量从33 W提高到了63 W. 相关实验装置的示意图如图6所示.

3.2 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术实验研究

相变蓄热结合夜间通风复合降温技术有机结合了相变蓄热技术和夜间通风技术, 具有多种结合模式, 如相变蓄热体结合夜间通风、相变围护结构结合夜间通风以及相变蓄热装置结合夜间通风等. 不同的结合模式对于复合降温技术的降温节能效果至关重要, 许多研究者对此开展了广泛研究.

(i) 相变蓄热体直接结合夜间通风. 相变蓄热与夜间通风的结合模式中, 最直接的方式就是将相变蓄热体直接放置在室内, 通过夜间通风将冷量直接蓄存到蓄热体中. 张磊等人^[45]和张璞^[46]利用固/液混合石蜡封装在铝罐中作为蓄热体, 放置于西安的一栋高层建筑中. 对比研究了不同相变温度的石蜡对室内热环境的改善情况, 指出相变蓄热体结合夜间通风可以明显改善西安夏季室内热环境, 得出适宜西安地区的相变温度范围位于22~24℃区间. 该研究对西安地区应用相变蓄热结合夜间通风复合降温技术提供了参考.

(ii) 相变蓄热围护结构结合夜间通风. 另一种

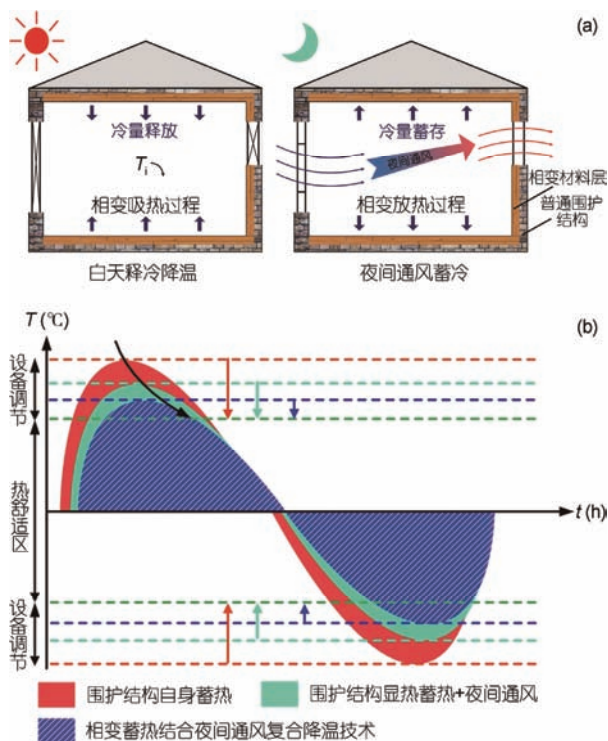


图5 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术原理(a)及调控目标(b)
Figure 5 Principle and control target of the coupled cooling technology.
(a) Technical principle; (b) technical effect

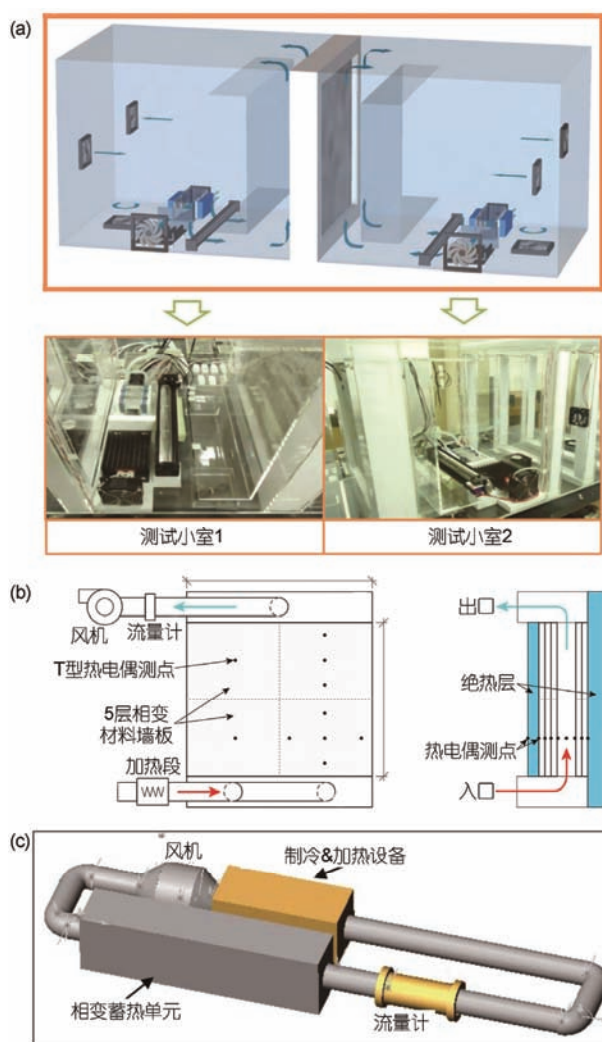


图6 (网络版彩色)通风强化相变材料传热机理实验装置. (a) 对比小室实验^[42]; (b) 相变墙板结合通风风道^[44]; (c) 相变蓄热加热冷却实验^[43]

Figure 6 (Color online) Mechanism experiment device of ventilation enhanced phase change storage process. (a) Comparative experiment with test cell^[42]; (b) phase change wallboards with airflow channel^[44]; (c) thermal storage with cooling and heating^[43]

相变蓄热结合夜间通风复合降温技术模式是将相变蓄热材料和围护结构结合,利用夜间通风和围护结构之间的换热来实现自然冷量的蓄存.李百战等人^[47]将自制的有机相变材料结合保温板材作为围护结构,搭建了两个轻质实验房间进行实验.通过对比相变材料在墙体上的不同布置方式,发现将高温相变材料布置在墙体外侧,低温相变材料布置在墙体内侧的方式降温效果更加显著,结合夜间通风能够降低室内温度达 11°C 左右.Barzin等人^[31]搭建了两个轻质围护结构房间,其中一间使用普通的石膏板,另

一间房间使用了浸润22%质量分数的相变石膏板并采用了夜间通风.两个实验房间均设置有空调系统,当室内温度超过舒适区间时,空调系统将会启动.通过实际气候下的对比实验,指出单独应用相变材料并不能够节约空调制冷能耗,但是结合夜间通风之后可以相对节省73%的能耗,获得理想的节能效果.沈阳建筑大学的冯国会等人^[48]针对夜间/白天不同的针对性通风需求,开发了一种新颖的相变蓄热通风墙.墙体中设置了填装有相变材料的PE管,墙体上开设室外/室内两套通风口,分别应用于夜间/白天的通风需求.实验证明使用了该墙体的房间对比普通房间在白天降温幅度可达 2.81°C .

(iii) 相变蓄热构件结合夜间通风.除了结合建筑自身进行蓄冷降温,相变蓄热体也可以作为建筑构件结合夜间通风蓄存冷量,这些蓄热构件布置灵活、便于与夜间通风进行有效结合.Kang等人^[49]提出了一种相变储能通风堆积床吊顶.该装置利用夜间凉风对储能吊顶进行蓄冷,白天通过室内空气循环释放冷量进行降温.实际建筑测试表明,该相变蓄能堆积床通风吊顶降温效果非常显著,采用该系统的实验房间其室内温度高于 30°C 的过热时间占比仅11%,远低于对比房间,而在62%的时间内室温均处于 28°C 以下的舒适条件.Stritih和Butala^[50]通过搭建蓄热通风实验台探索了相变蓄冷吊顶的各参数关系,得到了入口空气温度及空气流速和蓄冷吊顶蓄冷时间之间的函数关系.Lopez等人^[51]搭建了一种应用于夜间通风蓄冷的相变板材换热器,该换热器由多层相变材料板和其间的空气通道组成,空气通过时可以充分和相变材料进行热交换^[52].Xiang和Zhou^[53]提出了一种采用相变材料作为窗扇的百叶窗,夜间开窗通风过程中,流经窗扇的夜间凉空气和相变窗扇之间进行蓄冷,白天关闭窗扇,进行冷量释放而降温.利用北京的一间办公建筑作为对象进行了模拟计算,指出采用相变百叶窗结合夜间通风可以降低白天室内温度,并能维持更长的室内热舒适时间.表1对相变蓄热结合夜间通风复合降温技术不同结合模式的部分实验研究进行了归纳.

在实际应用推广中,复合降温技术受到诸多实际条件的限制.相变蓄热方面,表现为相变蓄热材料制备多停留在实验室研究阶段,工业生产体系还不够完善,市面上购买适宜建筑应用的相变蓄热材料较为困难,且价格较贵,仍没有一套健全的体系标准

表1 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术不同结合模式实验归纳

Table 1 Experimental of compound cooling technology in different combination patterns

结合模式	实验描述	参考文献
相变蓄热围护结构 结合夜间通风	利用微观封装的相变石膏板布置在办公建筑中, 在两个相同的测试房间中进行对比实验, 实验过程采用自然通风	[15]
	搭建两个对比测试房间, 尺寸2.4 m×2.4 m×2.4 m, 北向开窗1 m×1 m, 围护结构为13 mm厚的石膏板, 其中实验房间西墙替换为相变石膏板, 夜间通风采用风机进行辅助	[31]
	搭建两个对比实验房, 尺寸为1.5 m×1.5 m×2.0 m, 对比单独采用40℃相变材料及墙体外侧采用40℃、内侧采用33℃相变材料的布置方式, 实验过程采用自然通风	[47]
相变蓄热体直接 结合夜间通风	实验房间西墙采用相变墙, 墙内布置PE管封装66:34的癸酸和月桂酸共熔物相变材料, 墙上设置室外通风口、室内通风口及出风口, 利用风机进行辅助通风	[48]
	利用相变温度24.85℃的固/液混合石蜡封装在铝罐中放置于室内作为蓄热体, 夜间通风时段为23:00~7:00, 换气次数21.4 次/h	[46]
相变蓄热构件 结合夜间通风	采用22~26℃的脂肪酸相变材料, 作为蓄热吊顶安置于一间办公建筑中, 房间尺寸3.3 m×3 m×3 m, 装置放置于吊顶上2.4 m×3 m×0.12 m的空间中, 夜间通风从流经吊顶进入室内, 白天关闭进风口进行室内空气循环	[49]
	实验系统包含相变蓄热单元、风机、热电偶、流量计以及数据采集系统, 实验中测量多种相变材料及多种通风工况下相变蓄热单元的蓄放热特性	[50]
	相变材料板材+空气通道的换热器形式, 长1.2 m, 宽1.2 m, 总高0.096 m, 其中相变材料板厚度为0.03 m, 空气通道高度为0.018 m. 系统可以进行通风气流的温度、流速、湿度等参数的严格控制	[51]

对建筑用相变蓄热材料进行约束. 而在夜间通风方面, 多需要在建筑中辅以主动式机械通风设备, 会造成初始投入资金和运行过程中电力消耗的增加. Mi等人^[54]采用投资回收期(static payback period, SPP)分析了我国不同气候区典型城市办公建筑采用相变蓄热技术所带来的经济效益, 指出针对全年的运行周期, 严寒、寒冷、夏热冬冷地区典型城市(沈阳、长沙等)的经济效益较好, 而夏热冬暖及温和地区(香港、昆明)的经济收益较差, 相关经济分析对我国的相变蓄热技术应用具有参考价值.

3.3 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术热工设计

被动式节能技术需要因地制宜地结合自然条件, 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术也需要与当地的自然条件和使用环境相结合, 涉及相变温度、相变蓄热量以及通风策略等要素和气候的匹配关系. 首先, 需要结合使用条件选择合理的相变温度范围: 相变温度选择较低, 有可能在夜间通风蓄冷过程中不能充分发挥其潜热蓄热能力, 无法完全固化; 而相变温度选择较高时, 白天释放冷量的时间较为短暂, 冷量释放不够完全. 其次, 相变蓄热量的选择和夜间蓄冷能力、白天降温效果有直接联系, 过小的蓄热量对室内环境的调控能力不足, 而过大的蓄热量则会造成材料的浪费. 再者, 结合气候条件与相变温度, 制

定适宜的夜间通风策略也是该技术发挥良好效果的必备条件^[15]. 可见, 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术中各项要素之间需要进行合理匹配, 而将复杂的匹配关系精炼成一套面向建筑设计阶段的热工设计方法也是推广该技术的必然要求. 针对以上问题, Liu等人^[55,56]开展了先期研究, 利用EnergyPlus软件, 对我国西部5个典型城市应用相变蓄热结合夜间通风复合降温技术进行了模拟, 对比了不同气候条件下相变蓄热技术、夜间通风技术以及应用相变蓄热结合夜间通风的复合技术的应用情况. 结果证实, 相变蓄热结合夜间通风复合降温技术在我国西部城市中具有良好的应用前景, 这项工作也为日后开展相变蓄热结合夜间通风复合降温技术的热工设计研究奠定了良好的基础.

4 结论与展望

被动式低能耗建筑是解决现代建筑物高能耗问题的有效途径, 通过对建筑物自身性能的提升及对自然冷热量的充分利用, 在创造舒适室内环境的同时有效降低建筑运行能耗. 相变蓄热及夜间通风技术充分体现了被动式建筑设计思路, 两者有机结合的复合降温技术可以在夏季起到显著的节能降温效果, 具有广阔的应用前景.

相变蓄热结合夜间通风的复合降温技术需要重点关注3个问题: (1) 相变蓄热如何与建筑进行有效

结合; (2) 夜间通风如何得到高效利用; (3) 夜间通风与相变蓄热的协同作用规律问题. 本文针对以上问题, 对相关领域现有研究进行了分析, 将该复合降温技术分为相变蓄热技术和夜间通风技术两个构成模块. 其中, 影响到相变蓄热在建筑中高效利用的关键因素在于相变材料的类型、热物理性质、封装形式及优化结合模式等; 影响到夜间通风高效利用的关键要素在于夜间通风的气候适宜性、夜间通风控制策略以及通风和建筑蓄热的有效结合等. 同时, 为了更好地发挥相变蓄热和夜间通风协同作用下对室内热环境的改善效果, 相变蓄热和夜间通风各参数的合理匹配以及具体热工设计方法等因素也是该复合降温技术能够充分发挥其降温节能潜力所必须考虑的方面. 图7对相关研究领域各要素进行了归纳总结.

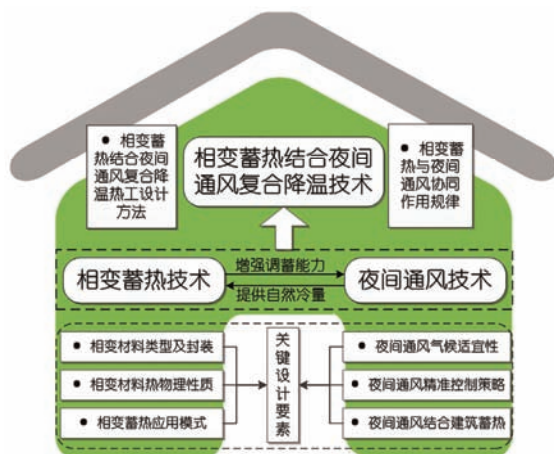


图7 (网络版彩色)相变蓄热及夜间通风技术研究体系

Figure 7 (Color online) Phase change heat storage and night ventilation technology research system

相变蓄热结合夜间通风复合降温技术具有可观的应用前景, 然而现有研究对该技术节能降温潜力的充分发挥仍显不足, 主要体现在以下3个方面.

(1) 相变蓄热可以有效蓄存夜间通风所提供的自然冷量, 而夜间通风可以对相变材料传热过程进行强化, 二者协同作用下的蓄换热耦合机理及降温规律有待进一步探究. 只有对相变蓄热和夜间通风之间的相互作用规律进行深入认识, 才能进一步指导复合降温技术在建筑中的充分应用.

(2) 在应用中, 合理地设计相变材料的蓄热量、布置方式以及夜间通风模式、逐时通风策略等要素, 关乎到该复合降温技术节能降温潜力的充分发挥. 目前, 对于相变蓄热结合夜间通风复合降温技术的热工设计方法仍显空白. 然而, 为建筑师提供简洁有效的热工设计方法, 是推广应用该技术的必经之路, 因此, 该复合降温技术的热工设计方法是我们亟待研究的重点.

(3) 现行版《民用建筑热工设计规范》(GB50176-2016)中提到了采用相变蓄热来增强建筑热稳定性的方式, 同时也强调了应当充分利用自然通风去除室内热量, 但是对于相变蓄热与夜间通风协同作用下的热工设计计算方法、节能设计指标等均未有涉及^[57]. 因此, 对相变蓄热结合夜间通风复合降温技术的进一步研究能够为我国民用建筑热工设计规范的修编提供理论参考, 有助于该技术的推广应用.

通过日后研究中对上述3个方面的深化和推进, 有望促使相变蓄热结合夜间通风复合降温技术取得更大进展, 进而推动我国建筑业的节能减排事业, 为我国实现可持续发展贡献力量.

参考文献

- Yang L, Yang J J, Song B, et al. Fundamental research and practice of passive and ultra-low energy consumption buildings (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 18: 1698–1710 [杨柳, 杨晶晶, 宋冰, 等. 被动式超低能耗建筑设计基础与应用. 科学通报, 2015, 18: 1698–1710]
- Yang L. Climatic Analysis and Architectural Design Strategies for Bio-Climatic Design (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003 [杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2003]
- Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls. Renew Sust Energy Rev, 2011, 15: 379–391
- Souayfane F, Fardoun F, Biwolle P H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. Energy Buildings, 2016, 129: 396–431
- Zhu X R, Yang L, Liu J P. Review of building night ventilation cooling research (in Chinese). Heat Ventil Air Condition, 2010, 40: 111–116 [朱新荣, 杨柳, 刘加平. 建筑夜间通风降温研究进展. 暖通空调, 2010, 40: 111–116]
- Zhang Y P, Zhou G B, Lin K P, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. Build Environ, 2007, 42: 2197–2209

- 7 Kuznik F, Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Appl Energy*, 2009, 86: 2038–2046
- 8 Kuznik F, Virgone J, Roux J J. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy Buildings*, 2008, 40: 148–156
- 9 Zhou D, Zhao C Y, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl Energy*, 2012, 92: 593–605
- 10 Akeiber H, Nejat P, Majid M Z A, et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renew Sust Energy Rev*, 2016, 60: 1470–1497
- 11 Zhang X S, Xia Y, Jin X. Review on phase change material building walls (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci)*, 2015, 45: 612–618 [张小松, 夏隼, 金星. 相变蓄能建筑墙体研究进展. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45: 612–618]
- 12 Feldman D, Banu D, Hawes D, et al. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Sol Energy Mater*, 1991, 22: 231–242
- 13 Shi X, Memon S A, Tang W, et al. Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. *Energy Buildings*, 2014, 71: 80–87
- 14 Cui H Z, Tang W, Qin Q, et al. Development of structural-functional integrated energy storage concrete with innovative macro-encapsulated PCM by hollow steel ball. *Appl Energy*, 2017, 185: 107–118
- 15 Schossig P, Henning H M, Gschwander S, et al. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Sol Energy Mat Sol C*, 2005, 89: 297–306
- 16 Lin K P, Zhang Y P, Xu X, et al. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Energy Buildings*, 2005, 37: 215–220
- 17 Xie J C, Li Y, Wang W L, et al. Comments on thermal physical properties testing methods of phase change materials. *Adv Mech Eng*, 2013: 1255–1260
- 18 Lachheb M, Karkri M, Albouchi F, et al. Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method. *Energy Convers Manage*, 2014, 82: 229–237
- 19 Ye R D, Lin W Z, Yuan K J, et al. Experimental and numerical investigations on the thermal performance of building plane containing $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ /expanded graphite composite phase change material. *Appl Energy*, 2017, 193: 325–335
- 20 Hussain S I, Dinesh R, Roseline A A, et al. Enhanced thermal performance and study the influence of sub cooling on activated carbon dispersed eutectic PCM for cold storage applications. *Energy Build*, 2017, 143: 17–24
- 21 Sun X Q, Zhang Q, Medina M A, et al. Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid-liquid phase change materials (PCMs). *Appl Energy*, 2016, 162: 1453–1461
- 22 Soares N, Gaspar A R, Santos P, et al. Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications. *Energy Buildings*, 2016, 116: 18–34
- 23 Bontemps A, Ahmad M, Johannès K, et al. Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls. *Energy Buildings*, 2011, 43: 2456–2461
- 24 Jin X, Medina M A, Zhang X S. On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance. *Appl Energy*, 2013, 106: 72–78
- 25 Jin X, Zhang S L, Xu X, et al. Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls. *Build Environ*, 2014, 81: 334–339
- 26 Lee K O, Medina M A, Raith E, et al. Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. *Appl Energy*, 2015, 137: 699–706
- 27 Ahmad M, Bontemps A, Sallée H, et al. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy Buildings*, 2006, 38: 673–681
- 28 Chen C, Guo H F, Zhou W. Experimental research of the composite phase change material in greenhouse (in Chinese). *Acta Energy Solaris Sin*, 2009, 30: 287–293 [陈超, 果海凤, 周玮. 相变墙体材料在温室大棚中的实验研究. *太阳能学报*, 2009, 30: 287–293]
- 29 Long L S, Ye H, Gao Y F, et al. Performance demonstration and evaluation of the synergetic application of vanadium dioxide glazing and phase change material in passive buildings. *Appl Energy*, 2014, 136: 89–97
- 30 Akeiber H J, Hosseini S E, Wahid M A, et al. Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation. *Energy Convers Manage*, 2017, 150: 48–61
- 31 Barzin R, Chen J J J, Young B R, et al. Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling. *Appl Energy*, 2015, 158: 412–421
- 32 Givoni B M. *Climate and Architecture*. 2nd ed. London: Applied Science Publishers, 1976
- 33 Artmann N, Manz H, Heiselberg P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Appl Energy*, 2007, 84: 187–201

- 34 Qi X L, Yang L, Liu J P. The applicability of night ventilation on office building in north china (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2011, 32: 669–673 [齐晓琳, 杨柳, 刘加平. 北方地区办公建筑夜间通风适用性分析. *太阳能学报*, 2011, 32: 669–673]
- 35 Qi X L. Study on the Thermal Design for Night Ventilation Building (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009 [齐晓琳. 北方办公建筑夜间通风降温潜力及适用性研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2009]
- 36 Artmann N, Jensen R L, Manz H, et al. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation. *Energy Buildings*, 2010, 42: 366–374
- 37 Dréau J L, Heiselberg P, Jensen R L. Experimental investigation of convective heat transfer during night cooling with different ventilation systems and surface emissivities. *Energy Build*, 2013, 61: 308–317
- 38 Yang L, Li Y G. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. *Energy Build*, 2008, 40: 2052–2058
- 39 Zhu X R, Bai L J, Yang L, et al. Experimental study of thermal mass and night ventilation in office building (in Chinese). *Acta Energy Solaris Sin*, 2015, 36: 1337–1343 [朱新荣, 白鲁建, 杨柳, 等. 办公建筑蓄热和夜间通风的实验研究. *太阳能学报*, 2015, 36: 1337–1343]
- 40 Zhu X R, Yang W, Yang L, et al. Optimization on critical design parameter of night ventilation buildings (in Chinese). *J Xi'an Univ Archit Tech (Nat Sci)*, 2016, 48: 401–405 [朱新荣, 杨雯, 杨柳, 等. 夜间通风建筑关键设计参数优化分析. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 48: 401–405]
- 41 Liu J P, Zhu X R, Yang L. Simplified calculation method for building night ventilation (in Chinese). PRC Patent, CN 102024080 B, 2012-03-14 [刘加平, 朱新荣, 杨柳. 建筑物夜间通风降温设计的简化计算方法. 中国专利, CN 102024080 B, 2012-03-14]
- 42 Xie J C, Wang W L, Liu J P, et al. Thermal performance analysis of PCM components heat storage using mechanical ventilation: Experimental results. *Energy Build*, 2016, 123: 169–178
- 43 Zalba B, Mariñ J M, Cabeza L F, et al. Free-cooling of buildings with phase change materials. *Int J Refrig*, 2004, 27: 839–849
- 44 Perino M, Dermardiros V, Chen Y, et al. Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications. *Energy Proced*, 2015, 78: 1690–1695
- 45 Zhang L, Yang L, Zhang P. Experimental research on the regenerative night ventilation performance of university dormitory (in Chinese). *J Xi'an Univ Archit Tech (Nat Sci)*, 2014, 46: 749–753 [张磊, 杨柳, 张璞. 高校宿舍楼夜间蓄热通风性能实验研究. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 46: 749–753]
- 46 Zhang P. Suitability of phase change materials for night ventilation cooling technique (in Chinese). Master Dissertation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 [张璞. 夜间通风相变储能材料的适宜性研究. 硕士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2013]
- 47 Li B Z, Zhuang C L, Deng A Z, et al. Improvement of indoor thermal environment in light weight building combining phase change material wall and night ventilation (in Chinese). *J Civil Archit Environ Eng*, 2009, 31: 109–113 [李百战, 庄春龙, 邓安仲, 等. 相变墙体与夜间通风改善轻质建筑室内热环境. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31: 109–113]
- 48 Feng G H, Han S Y, Liu X, et al. Experimental study on night ventilation effect in a phase change wall room in summer (in Chinese). *J Shenyang Jianzhu Univ (Nat Sci)*, 2013, 29: 693–697 [冯国会, 韩淑伊, 刘馨, 等. 相变墙房间夏季夜间通风效果实验. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29: 693–697]
- 49 Kang Y B, Jiang Y, Zhang Y P. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy Build*, 2003, 35: 417–425
- 50 Stritih U, Butala V. Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage. *Int J Refrig*, 2010, 33: 1676–1683
- 51 Lopez J P A, Kuznik F, Baillis D, et al. Numerical modeling and experimental validation of a PCM to air heat exchanger. *Energy Build*, 2013, 64: 415–422
- 52 Kuznik F, Lopez J P A, Baillis D, et al. Design of a PCM to air heat exchanger using dimensionless analysis: Application to electricity peak shaving in buildings. *Energy Build*, 2015, 106: 65–73
- 53 Xiang Y, Zhou G B. Thermal performance of a window-based cooling unit using phase change materials combined with night ventilation. *Energy Build*, 2015, 108: 267–278
- 54 Mi X, Liu R, Cui H, et al. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. *Appl Energy*, 2016, 175: 324–336
- 55 Liu Y, Liu J, Yang L, et al. Energy analysis of phase change wall integrated with night ventilation in Western China. In: *Proceedings of 15th International Building Simulation Conference (Building Simulation 2017)*. San Francisco: International Building Simulation Conference, 2017
- 56 Liu J, Liu Y, Yang L, et al. Annual energy saving potential for integrated application of phase change envelopes and HVAC in Western China. *Energy Proc*, 2017, 205: 2470–2477
- 57 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50176-2016 Thermal Design Code for Civil building (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2016 [中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50176-2016 民用建筑热工设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016]

Summary for “建筑相变蓄热及夜间通风技术研究进展”

Review of phase change heat storage and night ventilation technology of buildings

Liu Yang^{1,2}, Yuhao Qiao^{1,2}, Yan Liu^{1,2*}, Liqiang Hou^{1,2}, Mengyuan Wang^{1,2} & Jiaping Liu^{1,2}

¹ College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

² State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China

* Corresponding author, E-mail: liuyan@xauat.edu.cn

Building energy consumption is an important part of total energy consumption in societies; conservation of building operation energy is vital for sustainable development. The use of air conditioning systems to maintain a comfortable summer indoor thermal environment is a common practice in modern buildings, which consumes a large amount of nonrenewable energy and is detrimental to energy efficiency and human health. A passive building energy efficiency strategy is used to enhance the building's own performance and make complete use of natural energy to create a comfortable indoor thermal environment. Building passive energy conservation strategy is a powerful way to achieve sustainable development, promote economic development, and facilitate environmental protection. Phase change heat storage technology and night ventilation technology are efficient energy saving measures utilized in passive buildings. Phase change heat storage regulates the indoor heat distribution effectively through the phase change period to reduce the peak temperature and increase the lowest temperature in the indoor environment. Furthermore, ventilation during summer nights carries a lot of natural cooling and directly reduces the temperature of the indoor environment. The composite technology that integrates phase change thermal storage and night ventilation can significantly improve the summer indoor environment and reduce cooling energy consumption. The phase change material can absorb extra heat during daytime when indoor environment is hot and release it at night. Simultaneously, night ventilation can remove the heat released by the phase change material and provide cooling capacity to materials, thereby promoting the phase change process. Therefore, this composite technology can reduce the indoor temperature throughout the day. Moreover, the technology uses phase change heat storage to enhance the thermal stability of buildings and to solve the mismatch problem pertaining to the short-term supply of natural cooling resources and whole-day cooling demand of buildings. Alternatively, the technology utilizes night ventilation to fully acquire the natural cooling resources. In this paper, research progress of phase change heat storage and night ventilation cooling technology is reviewed based on the survey of the main field research on phase change heat storage, night ventilation, and composite cooling technology. This paper analyzes the components of the composite cooling technology from the aspects of technical principles, experimental research, energy savings, and cooling effects. The analysis shows that reasonable application of the composite cooling technology can obtain comfortable indoor environments and reduce cooling energy consumption during summer. This paper analyzes the mutual influence relationship between the constituent elements of the composite cooling technology. The technology is affected by various conditions, including climatic conditions, phase change heat storage models, ventilation strategies, etc. Furthermore, there is an urgency to perfect the thermal design standard of these technologies. Finally, the paper presents the prospects for further investigating the composite cooling mechanism and optimizing the thermal design strategy, and indicates the need for further in-depth research in the coupling mechanism of the technology and thermal design methods. This paper could help architects, engineers, and researchers understand these building passive energy saving technologies.

energy saving, building thermal engineering, phase change heat storage, night ventilation, compound cooling technology

doi: 10.1360/N972017-00788