建筑用相变蓄能材料研究现状与发展趋势

白静国

(天津市贰拾壹站检测技术有限公司，天津 300381)

摘要： 利用相变材料对清洁能源进行储存和使用已成为建筑节能设计的重要措施之一。对建筑用相变材料的研究和应用现状进行了总结概况，介绍了对建筑用相变材料的要求、常见种类、封装方法和选用原则，总结了相变材料与传统建筑材料复合、与建筑设施相结合两种主要应用形式，并通过案例阐述了已有的典型应用方法，讨论了相变材料在建筑中的应用面临的挑战和应用前景。为相变材料在建筑中的应用和研究提供参考。

关键词： 相变蓄能材料；节能；建筑

中图分类号： TU5 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2024)06－0226－09

联合国政府间气候变化专门委员会发布的报告表明，全球近 40%的能源消耗来自建筑业且主要是不可再生能源，同时建筑业每年贡献了高达 30%的温室气体排放量[1-2]。如今，建筑物单体普遍较大，装备暖通空调系统保持适当温湿度和新风补给是保障建筑内空气质量和舒适度的必要条件，由此产生的能耗占建筑总能耗的 40%以上[3]。随着设计水平和建筑材料的进步，大型建筑的传统构件已逐渐被轻质结构所取代[4]，虽然降低了建筑总体重量和材料消耗，但也牺牲了建筑的热惰性，增加了空调系统能耗。

人类社会正处于传统化石能源储量日益降低、全球大气环境污染和温室效益日益加剧，新能源的开发利用还不成熟的历史阶段。作为重要的能源消耗源，大型建筑的能源消耗情况也受到季节、工作时间的显著影响。加大对新能源的应用研究，实现对其高效收集、储存和调峰使用已经成为建筑节能设计的一个关键问题。利用相变材料(phase change materials，PCM)进行新能源的储存和匹配使用是解决这一问题的一个有效手段。将相变材料应用于建筑物中进行能量存储以实现建筑节能可追溯到 1980 年之前，Telkes[5] 和 Lane[6] 最早将相变材料应用于建筑物的供热和制冷，并进行了系列研究。随着相变材料的储热能力和稳定性的不断提升，其在建筑中的应用研究也越来越多，本文旨在对建筑用相变蓄能材料的研究现状和发展趋势进行归纳总结，为相变材料在建筑中的应用研究提供参考。

1 相变材料分类与要求

1.1 相变储能原理

材料的物理状态可以是固态、液态、气态或者固液混合态，不同相态下物质具有不同强度的分子间作用力。当物质从一种相态转变为另一种相态时，分子间作用力强度的变化伴随着能量的吸收或释放，借助这一物理现象可以实现能量的储存。相变材料通常有固-液、液-气和固-气三种相态变化模式，其中固-液相变储能材料的研究和应用最为广泛：当外界温度高于材料相变温度时，材料由固态转变为液态并吸收热量；当外界温度低于材料相变温度时，材料由液态转变为固态释放热量，最终实现能量的储存和调峰使用。

1.2 相变材料使用要求

如上所述，相变蓄能是利用材料从一种相态转变为另外一种相态过程中的热力学状态(焓)的变化。筛选材料时要综合考虑使用场景、安全性、经济性等诸多要素，在建筑领域应用的相变蓄能材料应该满足以下要求。

(1)相变温度稳定且与使用环境匹配。温差是热量传递的驱动力，过大的换热温差会使能量损失增大，过小的换热温差会导致换热速率降低，增大对换热器面积的要求，因此，要求所用相变材料的相变温度与换热对象的温度之差在一定的合理范围之内。

(2)材料具有较大的潜热值。相变材料的潜热值决定了单位质量相变材料的储能能力，潜热值越高，相同储能需求下所需要的相变材料越少，成本越低。

收稿日期： 2023-10-13

作者简介： 白静国(1986—)，男，内蒙古呼和浩特人，硕士，高级工程师，研究方向为建筑节能材料及检测技术研发。

(3)蓄能/释能循环性好。相变材料的储能和释放能量频次由使用场景决定,对于建筑物通常考虑利用太阳能、风能或晚间谷电进行蓄能,平电、峰电阶段释放所蓄能量。蓄能材料需要进行反复的蓄能-释能循序,这就要求材料化学属性稳定,不会在反复冻融过程中发生化学变化,继而影响相变温度或潜热值。

(4)热物性良好。蓄能和释能过程均需要通过传热过程实现,传热效率将直接决定蓄能/释能的时间。相变材料在液相时应有良好界面润湿能力,以便充分地填充界面间的空隙,增大有效换热面积;固相时有良好的导热性能。最终使蓄能和释能过程均有较好的换热系数。

(5)经济性良好。建筑体积庞大,对于蓄能量普遍要求较高,致使相变材料数量需求普遍较大,因此要求采用的相变材料的价格要低,降低蓄能系统的整体投资。

(6)化学性能良好。蓄能材料需要无毒、无污染,对其他材料的腐蚀性较低,降低整体维护和后期处理成本。

1.3 相变材料分类

相变材料可以有多种分类方式,按化学性质可分为有机相变材料、无机相变材料和复合相变材料,按相变状态可分为固相-气相、液相-气相、固相-固相、固相-液相相变材料,按相变温度可分为高温相变材料(>120 ℃)、中温相变材料(70~120 ℃)和低温相变材料(0~70 ℃)。其中按照化学性质进行分类是目前最为常见的分类方法,具体如下。

1.3.1 有机相变材料

有机相变材料是利用晶型之间的转变和高分子支链在不同温度下的转变而吸热或放热,最常见的有机相变材料是石蜡和酯酸类。有机相变材料的化学性质和热稳定性良好,通常无腐蚀性,过冷度较小,可回收;然而有机相变材料往往具有一定的可燃性,导热性和相变潜热低于其他类型的相变材料。建筑物中常用有机相变材料及其相主要参数如表1所示。

1.3.2 无机相变材料

无机相变材料主要是通过结合水的脱离或结合实现能量的吸收或者释放。常见的无机相变材料主要包括盐水混合物、盐和金属等。无机相变材料通常密度相对较高,因此具有较高的潜热,价格也相对较低。然而,无机相变材料普遍具有一定的腐蚀性、过冷较大、相偏析、热稳定性差等局限性。建筑领域常用无机相变材料如表2所示。

表1 常用有机相变材料及主要参数

相变材料成分	相变温度/℃	潜热/(kJ·kg^{-1})	参考文献
硬脂酸丁酯	19	140	[7]
石蜡 C16-C18	20~22	152	[8]
癸酸-月桂酸	21	143	[7]
萨巴二酸二甲酯	21	120	[9]
聚乙二醇 E 600	22	127.2	[10-11]
石蜡 C13-C24	22~24	189	[12]
34%米斯提酸+66%癸酸	24	147.7	[11]
1-十二烷醇	26	200	[7]
石蜡 C18(45-55%)	28	244	[12]
硬脂酸乙烯酯	27~29	122	[9]
癸酸	32	152.7	[10-11]

表2 常用无机相变材料及主要参数

相变材料成分	相变温度/℃	潜热/(kJ·kg^{-1})	参考文献
氟化钾	18.5	231	[12,14]
六水硝酸锰	25.8	125.9	[15]
六水氯化钙	29	190.8	[10-11]
硝酸锂	30	296	[13]
十水硫酸钠	32	251	[7,12,14]

1.3.3 复合相变材料

建筑用复合相变材料是由一种或几种相变材料与载体材料组合而成。利用网络状物质为基质以维持材料的形状、力学性能,作为相变材料的物质嵌在网络结构基质中。通过相变吸收或释放能量,具有较大的相变潜热、较高的热导率和合适的相变温度,更好地解决了有机相变材料热导率低、无机相变材料的相分离和过冷现象等问题[16]。目前,常采用纳米颗粒作为基体制备纳米复合相变材料[17-19],采用多孔介质载体制备定形相变材料[20-22],可有效改善材料的热导率性能,在建筑领域具有非常好的应用前景。一些学者[23-25]对有机和无机相变材料的优缺点进行了总结,如表3所示。

1.4 相变材料制备与封装方法

为避免相变材料在使用过程中发生泄漏,造成经济损失,污染建筑物中,需对其进行封装或制作成特定形状,目前常见的方法有直接浸渍法、浸泡吸附法和封装法(纳米、宏观和微观)[26]。

1.4.1 直接混合法

将液体或粉末状的相变材料直接与石膏、混凝土等建筑基体材料混合制成均匀的储能相变材料。该方法不需要额外的设备,是使用相变材料成本最低、最简单的方式,但可能存在泄漏和与建筑材料不兼容的问题。例如,相变材料直接引入混凝土混合物时,破坏混凝土性能[27]的风险更大,可能会影响到原建筑材料的耐久性和稳定性。

表 3　有机和无机相变材料的优缺点总结

分类	无机	有机	复合
种类	结晶水合物、熔盐、金属或合金	高级脂肪烃，酸或盐，醇类，芳香烃，芳香酮，内酰胺，氟利昂，多碳酸类，聚合物	有机相变材料中添加高导热性能的金属或非金属颗粒
优势	更高的储能密度，更高的热导率	物理和化学稳定性，良好的热性能，过渡区可调	较大的相变潜热、较高的热导率和合适的相变温度
缺点	过冷，相分离，腐蚀性	低热导率，低密度，低熔点，高挥发性，易燃，体积变化	
改进方法	混合成核剂和增稠剂，薄层水平排列，机械搅拌	高导热性添加剂，阻燃添加剂	

于文艳和殷凯[28]将微胶囊相变材料加入腻子粉中制备复合相变涂料应用于水泥板内表面，结果表明复合相变涂层能明显降低峰值温度和温度的波动范围，起到调节室温的作用。微胶囊相变材料含量为 30%的复合相变涂层室内温度保持 24～28 ℃的时间比普通涂层延长 23.5 min。

1.4.2　*浸泡吸附法*

通过浸泡将相变材料渗入多孔的建材基体中，通过毛细作用吸收相变材料，该方法工艺简单，可使传统的建筑材料（如石膏板）容易变成具备蓄能功能的建材。该方法制备的相变材料也有一定的局限性，主要表现为：经过多次相变循环后热物理性质易降低，存在泄漏风险，此外相变材料的腐蚀性会影响构件的机械和耐久性能。

Feldman 等[29]采用浸泡和混合两种方法制备了相变储能石膏板，后者得到的相变储能石膏板所含相变材料的量均匀。Lee 等[30]采用直接浸泡法分别制备了硬脂酸丁酯和商业石蜡两种相变储能混凝土材料，并比较了两者与普通混凝土块的储热性能和吸放热，结果表明浸泡后的相变混凝土材料在一定的时间内可以储存热量。

此外，可以利用真空提高相变材料浸渍效率和效果，所得到的复合材料可称为多孔材料基相变材料。Memon 等[31]使用真空浸渍法将月桂醇掺入高岭土中，开发新型形状稳定的复合相变材料，由于毛细管和表面张力的作用，月桂醇占据高岭土的多孔和层状结构，所得复合相变材料具有良好的热稳定性和可靠性。

1.4.3　*封装法*

为了解决泄露的问题，可以将相变材料封装在一定的基体材料中，使其与周围环境隔离，增强相变材料的热稳定性、机械稳定性和热导率。封装质量可以通过机械强度、柔韧性、耐腐蚀性和热稳定性等指标衡量。根据相变材料的封装尺寸可为宏封装（>1 mm）、微胶囊封装（1～1 000 μm）和纳米封装（0～1 000 nm）。

宏封装是相变储能应用中常用的封装方法，封装容器的形状可以是球形、管状、圆柱形或矩形。封装材料的选取需要考虑其与相变材料的兼容性，最常用的封装材料为塑料，当对导热要求较高时，则需要使用金属材料封装。

微胶囊封装是在相变材料表面包覆一层聚合薄膜而构成的具有类似胶囊的结构，微胶囊的形状多种多样，该方法所得产品比表面积越大，能量传递量大能够承受相变过程中体积的变化，较高的传热速率使得微胶囊相变材料能够快速熔化和凝固。此外，微胶囊封装还具有易于运输和处理、能够设计封装、材料兼容性好、外部体积变化小等诸多优势。

随着纳米技术的不断进步，相变材料已经可以实现在纳米尺度上的封装。纳米封装相变材料可以在液体中形成稳定的分散体但不会显著增加其黏度，特别适合应用于建筑中需要蓄能输配的场景中。此外，纳米封装相变材料耐机械应力的能力高于微胶囊封装。

1.5　相变材料选用原则

相变材料的热物理性质主要包括相变温度、相变潜热、热容、导热系数和膨胀系数等。相变温度直接决定相变材料的用途和应用领域，相变潜热、导热系数等直接影响材料的蓄热密度、吸放热速率等重要性能，膨胀系数会影响相变材料与基体、容器等的相容性及耐久性。在选取相变材料时，主要从相变材料的热物性、物理和化学性能及经济实用性等方面考虑，如图 1 所示，具体包括：①与工作温度相匹配的相变温度；②高相变潜热；③高导热性；④可逆性好；⑤膨胀收缩性小；⑥化学和物理性质稳定；⑦密度大、比热容大；⑧不易燃、无爆炸性、无毒性及腐蚀性；⑨储存丰富、价格低廉、容易大规模制备。

2　相变材料在建筑中的应用方式

2.1　与传统建筑材料复合

相变材料在建筑中最常见的应用方式是将其与传统建筑材料复合，形成具有蓄能功能的结构部件，如墙体、屋顶、地板等，提高建筑的隔热效果和热惰性。

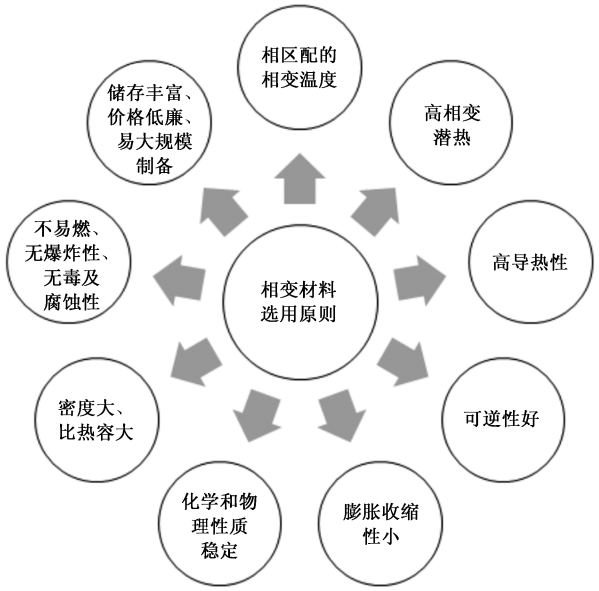

图 1　相变材料的选用原则

2.1.1　与水泥砂浆结合

何以芹和冯金荣[32]采用有机类固-液相变材料,用微胶囊法制备以脲醛树脂为壁材,脂肪酸为芯材的相变保温砂浆,将其应用于外墙保温体系改造。结果表明,使用相变保温砂浆的外墙温度为25 ℃,未使用相变保温砂浆的温度为20 ℃左右,相变保温砂浆具有更好的保温效果。陈金平等[33]利用膨胀珍珠岩吸附石蜡制备出膨胀珍珠岩-石蜡相变储热材料,选用球型1～4 mm膨胀珍珠岩作为储能载体吸附相变材料制成相变膨胀珍珠岩作为细集料,将其与普通水泥砂浆直接混合制成了相变储能砂浆,其温度变化率和潜热变化率较小、稳定性好。总体而言,将相变材料应用于水泥砂浆中能够增强建筑调温能力。

2.1.2　与墙板结合

对于相变材料的注入过程,可以通过浸泡或浸渍完成,这个过程包括将建筑材料浸泡在PCM液体中[34]。这种方法比传统的直接混合模式更昂贵,用于建筑墙壁的建筑材料通常是石膏[35]或石膏水泥,生产的石膏板可以含有高达30%的PCM重量。比如可以采用石蜡RT20(质量分数26%)作为相变材料,通过浸泡吸附法将石蜡集成到石膏墙板中形成相变石膏墙,并将其放在一个室内空间里,可有效降低室内气温的昼夜波动,并将室内温度长时间保持在所需的舒适水平,带来更健康的室内空间和更好的节能性[36]。

张维维等[37]以石膏为基体材料,癸酸为相变材料制成定形相变石膏板,和普通石膏板进行了实验对比。结果表明,在同样的加热和散热条件下,相变蓄能石膏板比普通石膏板具有更强的蓄放热能力;夏季当相变墙体相变温度为26 ℃时房间节能效果最好,能够使室内获得热量减小37.73%;冬季当相变墙体相变温度为7 ℃时房间节能效果最好,能够使室内获得热量减小28.71%。闫亚鑫等[38]提出相变蓄热型Trombe墙应用于寒冷地区气候条件下的冬季辅助供热系统,并且开展了实验测试研究,结果表明相变蓄热型Trombe墙具有良好的蓄热和辅助供热特性,可以有效延长空气通道的通风时间进而实现延续供热。

2.1.3　与混凝土结合

将适当的相变材料与混凝土基质或开孔水泥相结合是相变材料在建筑领域应用的另外一种形式。Cabeza等[39]使用微胶囊方法将相变材料(熔点为26 ℃,相变焓为110 kJ/kg)封装到混凝土中,分别建造了相变混凝土和普通的混凝土隔间,结果表明相变混凝土改善了热惯性并降低了内部温度,同时在冷却过程中节约了大量的能量。Yang等[40]以月桂醇和硬脂酸为原料,用陶粒作为封装材料,应用了基于多孔材料的吸附方法制作成复合相变材料并加入混凝土中,实验结果表明当复合相变材料质量分数为15%时,相变储能混凝土既满足建筑材料的承载能力需求,又具有良好的蓄热性能。Ren等[41]在真空条件下分别用陶粒和浮石两种轻骨料吸附脂肪酸(月桂酸、肉豆蔻酸和棕榈酸作为共溶的三元脂肪酸)制成了两种封装蓄热骨料。实验结果表明,新型混凝土的导热系数最大可提高15.8%,对温度波动具有调峰作用,使室内温度最多降低8.7 ℃。顾皖庆等[42]采用多孔材料吸附法,以膨胀珍珠岩浸泡吸附月桂醇来制作复合相变材料,通过渗漏性试验研究复合相变材料的稳定性。结果表明,膨胀珍珠岩吸附月桂醇的适宜吸附时间为4 h,适宜吸附温度为50 ℃。

2.1.4　与屋顶或窗户结合

一些学者研究了一种带有锥形孔的建筑屋顶,并将石蜡作为相变材料填充到锥形孔中(图2),该方法可使相变材料在熔化过程中的膨胀不影响屋顶结构。在炎热季节通过熔化过程吸收热量来减少从室外到室内空间的热流,而寒冷的季节保持固态,屋顶室内表面的热通量最多可减少39%[43]。澳大利亚的研究人员模拟了采用聚乙二醇作为屋顶的相变材料对建筑物年供暖和制冷负荷的影响。结果表明,相变材料屋顶能够显著改善建筑热惯

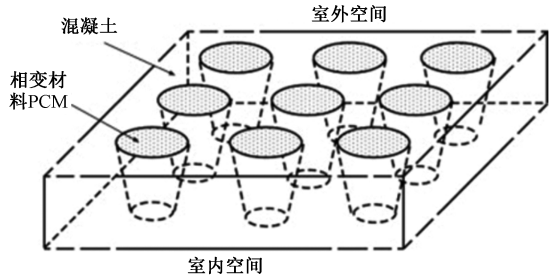

图 2　带有填充 PCM 锥形孔屋顶示意图

性，降低室内温度幅值，具有更好的热舒适性[44]。此外，还有学者研究了在双层玻璃中间空腔内加入石蜡制作成的相变玻璃（图 3），与传统玻璃窗相比，相变玻璃窗可以降低玻璃内表面的峰值温度，降低建筑物的能耗，夏季可降低建筑热增益 50％以上，冬季效果不明显[45]。

相变储能材料可以用来调节室内温度、降低室内峰值温度、增加温度时滞，以及减少能源的消耗。但研究也发现了一些问题，如相变过程中导热性差，相变泄漏可能导致复合材料的热物理性能变差，热循环后热性质也可能变差。此外，单一熔点相变材料也无法满足全季节内的温度变化[46]。

2.2　相变蓄能材料与建筑设施相结合

2.2.1　和空气处理系统结合

将相变蓄能材料与空气处理设备结合，形成具有调节空气温湿度和新风换气功能的系统。这种方式可以有效地改善室内空气质量和舒适度，减少空调运行时间和费用。

有研究人员使用无机材料 ATS 30（熔点 30 ℃，潜热 200 kJ/kg）作为相变材料集成到热泵空调系统中（图 4），发现集成相变材料的空调系统可以有效地削减了电网的高峰负荷，节省 7％的能源费用[47]。

一些学者研究了配备相变存储单元蓄热的新风冷却系统在各种气候条件下的能源效率（图 5），其中相变存储单元为长方体，使用球形宏封装石蜡作为相变材料，结果表明，在当地条件下一个办公楼可以实现节电 7％～41％，可有效减少碳排放[48]。

杜文超等[49]制备了相变温度为 21.3 ℃的无机水和盐相变材料，用于空调制冷系统。相变材料安装在空调的室内出风口，当环境温度较高时，利用制冷压缩机实现空调制冷，同时相变材料储存冷能；当外部环境温度较低时，利用自然风能实现空调，同时相变材料储存冷能。在压缩机不工作，空调与外界风隔离时，风机装置带动室内空气循环，

图 3　室外测试设施实物

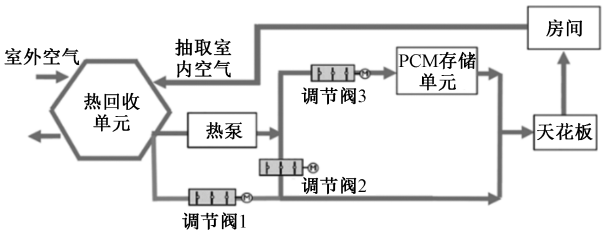

图 4　相变材料与热泵系统的集成原理

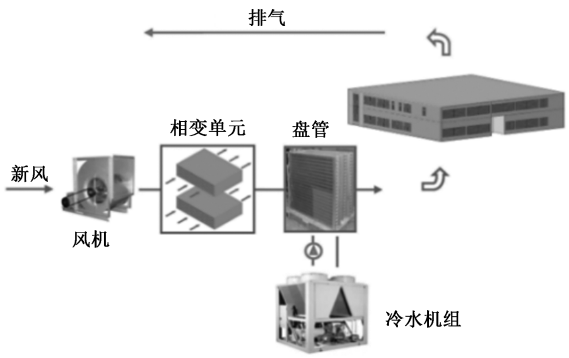

图 5　新风冷却系统示意图

配合储能模块实现制冷，节能效率可达 28.3％（图 6）。

2.2.2　与地板采暖系统结合

目前，地板辐射供暖系统已在许多国家得到广泛应用，一些研究人员将相变材料应用到了地板辐射供暖系统中，在不影响热舒适性的情况下显著提高了建筑能源效率。

Jin 和 Zhang[50]对含有两个不同熔点的相变材料层的辐射地板采暖系统（图 7）进行了数值研究，由表层（木材）、冷却用相变材料层、加热用相变材料层、混凝土层、水管和保温层组成。加热用和冷却用相变材料的最佳熔化温度分别为 38 ℃和 18 ℃，最佳熔化温度会随着两层相变材料层位置的

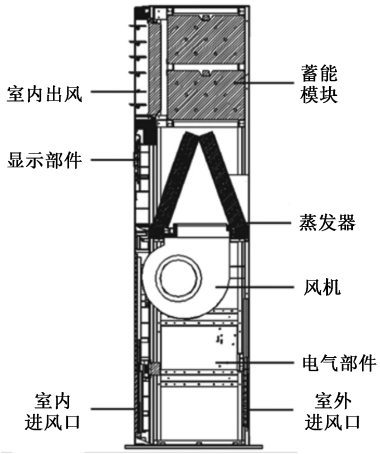

图 6　相变储能轻型柜式空调结构示意图

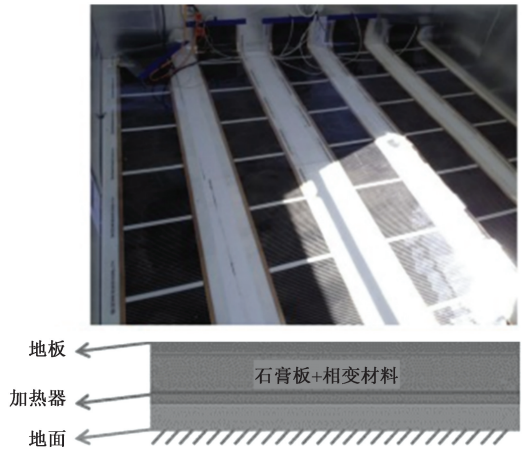

图 8　PCM 地板采暖系统示意图

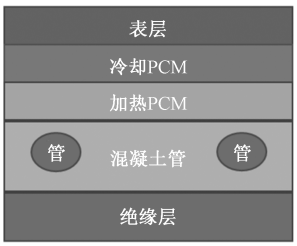

图 7　双层 PCM 地板示意图

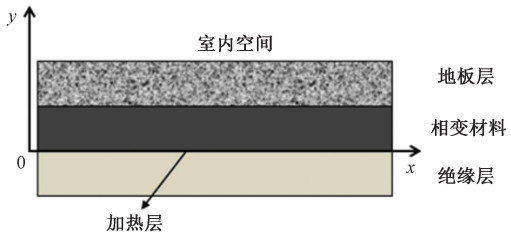

图 9 简化地板供暖系统示意图

变化而变化;与常规地板相比,该地板系统在加热和冷却过程中分别可多传递 41.1%和 37.9%的能量。

Barzin 等[51]研究评估了相变材料地板采暖系统与相变材料墙板相结合(图 8)的性能,地板上覆盖着 10 mm 厚的石蜡基聚相变材料(峰值熔点为 28 ℃,潜热储存能力为 120 J/g)浸渍的石膏板,墙板采用的是杜邦墙板。5 天内总节能和电力成本分别为 18.8%和 28.7%,其间节能峰值可达 35%,相应的成本节约为 44.4%。在一项类似的研究中,Cheng 等[52]从理论和实验角度探讨了相变材料的热导率对能源节约和经济效益的影响,在一个带有地暖系统的测试房间中引入了由(固体石蜡+液体石蜡)/高密度聚乙烯/膨胀石墨制成的相变材料,其电热膜布置在地板表面下方(图 9),并将该系统的运行特性与非相变储能系统和传统空调系统进行了比较。结果表明,在一定范围内提高相变材料的热导率可以显著提高供暖系统的能源效率。

2.2.3　与通风系统结合

自然冷却是在夜间储存室外冷量,并在白天供应室内空气的方法。由于室内白天和室外夜晚的温差很小,因此相变材料是最佳的存储选择。Stathopoulos 等[53]在一项研究中将 PCM 被用于在高峰时段进行负荷转移的供暖应用,建立了 PCM 换热器的原型,并开发了数值模型来研究 PCM 换热器的行为。研究表明,相对简单的数值模型能够准确地再现 PCM 换热器的实验行为。Mankibi 等[54]研究了 PCM 被应用于通风系统中的供暖应用中的换热器,以在高峰时段进行负荷转移,开发了数值模型,并在一个矩形通用房间中测试了一个原型。这项研究表明,当在夜间给 PCM 模块充电时,换热器的性能在很大程度上取决于换热器的绝缘,因为 PCM 应保持充电的时间较长。因此,增加绝缘可以防止 PCM 的非自愿放电。在大量的测试配置中,研究表明可以进行负荷转移,而不会影响热舒适度或室内空气质量。

3　未来的研究展望

在建筑中使用相变材料以节省能源消耗,学者进行了广泛的相关研究,但相变蓄能材料在建筑中的应用还面临着一些问题和挑战,这也是未来的研究方向和重点。

(1)相变蓄能材料的导热率低,影响了其充放热效率和速率。为了增强其导热性能,需要添加纳米颗粒、纳米片、纳米线等高导热物质。纳米材料的应用可以提高相变材料的热传导性能、提高相变材料的稳定性和循环寿命,并增加相变材料的吸附

容量。

(2)相变蓄能材料的稳定性差,容易发生老化、分解、泄漏等现象。为了提高其稳定性,需要改善其封装方式、选择合适的载体材料、控制工作温度范围等。

(3)微/纳米复合技术的主要瓶颈是高昂的加工成本和选择合适的材料。为了商业化和扩大复合技术的使用,必须简化合成过程并降低封装成本。

(4)建筑物中相变材料的复合方法仍然是研究人员面临的一大挑战,以增强建筑材料的热、机械和循环稳定性和耐腐蚀性。因此,未来的研究必须进行以增加机械和热稳定性为目的的研究。

4 结论

随着相变材料的储热能力和稳定性的不断提升,其在建筑中的应用研究也越来越多。目前的研究主要集中在相变材料和传统建筑材料复合、相变材料与建筑设施结合两个方面。学者们分别研究了相变材料在相变砂浆、墙板、混凝土、天花板,以及在空气处理系统、地板采暖系统和通风系统上的应用,可见相变材料前景巨大。相变储能建筑材料的大规模商业化使用需要考虑相变材料的种类、相变温度范围、与传统材料复合的百分比、使用区域的气候以及使用建筑物的结构等因素。相变储能建筑材料的热传递模型,各种构件和相变系统的设计等方面,仍然需要进一步研究。

参考文献

[1] ZHAI Z J, HELMAN J M. Implications of climate chang-es to building energy and design[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 511-519.

[2] CHAI J, HUANG P, SUN Y. Investigations of climate change impacts on net-zero energy building lifecycle performance in typical Chinese climate regions[J]. Energy, 2019, 185: 176-189.

[3] ARAM K, TAHERKHANI R, ŠIMELYTĖ A. Multi-stage optimization toward a nearly net zero energy building due to climate change [J]. Energies, 2022, 15 (3): 983.

[4] VOELKER C, KORNADT O, OSTRY M. Temperature reduction due to the application of phase change materials [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 937-944.

[5] TELKES M. Thermal energy storage in salt hydrates[J]. Solar Energy Materials, 1980, 2(4): 381-393.

[6] LANE G A. Adding strontium chloride or calcium hydroxide to calcium chloride hexahydrate heat storage material[J]. Solar Energy, 1981, 27: 73-75.

[7] HAWES D W, FELDMAN D, BANU D. Latent heat storage in building materials[J]. Energy andBuildings, 1993, 20(1): 77-86.

[8] ZALBA B, MARÍN J M, CABEZA L F, et al. Free-cooling of buildings with phase change materials[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(8): 839-849.

[9] FELDMAN D, SHAPIRO M M, BANU D. Organic phase change materials for thermal energy storage[J]. SolarEnergy Materials, 1986, 13(1): 1-10.

[10] DINCER I. On thermal energy storage systems and applications in buildings[J]. Energy andBuildings, 2002, 34(4): 377-388.

[11] LANE G A. Low temperature heat storage with phase change materials[J]. International Journal of Ambient Energy, 1980,(3): 155-168.

[12] ABHAT A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials[J]. SolarEnergy, 1983, 30(4): 313-332.

[13] BAUMANN H, HECKENKAMP J. Latent wärm espeicher[J]. Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium, 1997, 45(11): 1075-1081.

[14] NAUMANN R, EMONS H H. Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35: 1009-1031.

[15] WADA T, YOKOTANI F, MATSUO Y. Equilibria in the aqueous ternary system containing Na^+, $CH_3CO_3^-$, and $P_2O_7^{4-}$ between 38 ℃ and 85 ℃[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 1984, 57(6): 1671-1672.

[16] 张秋香, 陈建华, 陆洪彬, 等. 纳米二氧化硅改性石蜡微胶囊相变储能材料的研究[J]. 高分子学报, 2015(6): 692-698.

[17] 王继芬, 谢华清, 辛忠, 等. 纳米ZnO/石蜡复合相变材料的热物理性质研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32 (11): 1897-1899.

[18] MARTÍN M, VILLALBA A, INÉS FERNÁNDEZ A, et al. Development of new nano-enhanced phase change materials (NEPCM) to improve energy efficiency in-buildings: lab-scale characterization [J]. Energy and Buildings, 2019, 192: 75-83.

[19] 李果, 欧阳婷, 蒋朝, 等. 碳纤维-纳米石墨片网络体导热增强石蜡相变储能复合材料的制备及表征[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1130-1137.

[20] WEN R, ZHANG X, HUANG Z, et al. Preparation and thermal properties of fatty acid/diatomite form-stable composite phase change material for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 178: 273-279.

[21] YUAN Y G, YUAN Y P, ZHANG N, et al. Preparation and thermal characterization of capric-myristic-palmitic acid/expanded graphite composite as phase change material for energy storage[J]. Materials Letters, 2014, 125: 154-157.

[22] 李海丽，季旭，冷从斌，等. 膨胀石墨/五水硫代硫酸钠相变储能复合材料热性能[J]. 复合材料学报，2016，33(12)：2941-2951.

[23] MEHLING H，CABEZA L F. Heat and cold storage with PCM：an up to date introduction into basics and applications[M]. Berlin：Springer，2008.

[24] ZALBA B，MARIN J M，CABEZA L F，et al. Review on thermal energy storage with phase change：materials，heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering，2003，23(3)：251-283.

[25] WANG X，ZHANG Y P，XIAO W，et al. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope[J]. Chinese Science Bulletin，2009，54：920-928.

[26] CUI Y，XIE J，LIU J，et al. Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving[J]. Procedia Engineering，2015，121：763-770.

[27] NAVARRO F L，GRACIA C A，NIALL D，et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems：integration as passive system[J]. Renewable Energy，2016，85：1334-1356.

[28] 于文艳，殷凯. 复合相变蓄热涂层的蓄放热调温特性[J]. 科学技术与工程，2023，23(31)：13492-13498.

[29] FELDMAN D，BANU D，HAWES D. Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，1995，36(3)：311-322.

[30] LEE T，HAWES D W，BANU D，et al. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2000，62(3)：217-237.

[31] MEMON S A，LO T Y，SHI X，et al. Preparation，characterization and thermal properties of Lauryl alcohol/Kaolin as novel form-stable composite phase change material for thermal energy storage in buildings[J]. Applied Thermal Engineering，2013，59(1-2)：336-347.

[32] 何以芹，冯金荣. 相变保温砂浆的制备及应用[J]. 中外建筑，2014(6)：169-170.

[33] 陈金平，杨权明，胡良强，等. 膨胀珍珠岩-石蜡相变储能砂浆的力学性能研究[J]. 粉煤灰综合利用，2016(2)：34-36.

[34] HAWES D W，BANU D，FELDMAN D. Latent heat storage in concrete[J]. Solar Energy Materials，1989，19(3-5)：335-348.

[35] SHARIFI N P，SHAIKH A A N，SAKULICH A R. Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals[J]. Energy and Buildings，2017，138：455-467.

[36] FARID M M，SHERRIF A. Phase change materials for energy storage and thermal comfort in buildings[M]. UK：Woodhead Publishing Limited，2010：384-398.

[37] 张维维，方学旺，周沁宇，等. 相变蓄能石膏板在建筑围护结构中的热影响分析[J]. 科学技术与工程，2015，15(1)：112-115.

[38] 闫亚鑫，雷勇刚，景胜蓝，等. 相变蓄热型 Trombe 墙冬季供热性能的测试分析[J]. 科学技术与工程，2019，19(26)：232-238.

[39] CABEZA L F，CASTELLON C，NOGUES M，et al. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings[J]. Energy andBuildings，2007，39(2)：113-119.

[40] YANG Y Y，WU W D，FU S Y，et al. Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings[J]. Construction and Building Materials，2020，246：118479.

[41] REN M，LIU Y S，GAO X J. Incorporation of phase change material and carbon nanofibers intolightweight aggregate concrete for thermal energy regulation in buildings[J]. Energy，2020，197：117262.

[42] 顾皖庆，马芹永，白梅，等. 月桂醇膨胀珍珠岩复合相变材料吸附试验与分析[J]. 科学技术与工程，2018，18(25)：230-235.

[43] ALAWADHI E M，ALQALLAF H J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load：numerical study[J]. Energy Conversion and Management，2011，52(8/9)：2958-2964.

[44] JAYALATH A，AYE L，MENDIS P，et al. Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney[J]. Energy and Buildings，2016，121：152-158.

[45] GOIA F，PERINO M，SERRA V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype[J]. Solar Energy，2014，100：217-233.

[46] 王磊，任苗. 建筑相变储热水泥基材料国内外研究进展[J]. 水利科学与寒区工程，2023，6(3)：16-22.

[47] HU Y，HEISELBERG P K，DRIVSHOLM C，et al. Experimental and numerical study of PCM storage integrated with HVAC system for energy flexibility[J]. Energy and Buildings，2022，255：111651.

[48] POP O G，TUTUNARU L F，BODE F，et al. Energy efficiency of PCM integrated in fresh air cooling systems in different climatic conditions[J]. Applied Energy，2018，212：976-996.

[49] 杜文超，高洪涛，郭玮，等. 相变储能技术在轻型柜式空调上的应用[J]. 制冷与空调，2019，19(5)：27-30.

[50] JIN X，ZHANG X. Thermal analysis of a double layer phase change material floor[J]. Applied Thermal Engineering，2011，31(10)：1576-1581.

[51] BARZIN R，CHEN J J J，YOUNG B R，et al. Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wall boards for space heating using price based control system[J]. Applied Energy，2015，148：39-48.

[52] CHENG W，XIE B，ZHANG R，et al. Effect of thermal

conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system[J]. Applied Energy, 2015, 144: 10-18.

[53] STATHOPOULOS N, MANKIBI M, ISSOGLIO R, et al. Air-PCM heat exchanger for peak load management: experimental and simulation[J]. Solar Energy, 2016, 132: 453-466.

[54] MANKIBI M, STATHOPOULOS N, REZAI N, et al. Optimization of an Air-PCM heat exchanger and elaboration of peak power reduction strategies[J]. Energy and Buildings, 2015, 106: 74-86.

Research Status and Development Trend of Phase Change Energy Storage Materials for Buildings

BAI Jingguo

(Tianjin Ershiyizhan Inspection Technology Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: At present, using phase change materials to store and use clean energy has become one of the important ways to design energy-saving buildings, so the research and application of phase change materials for buildings was summarized. Firstly, the requirements, common types, preparation methods and selection principles of phase change materials used in architecture were introduced. Then, two main application forms of phase change materials were summarized in detail, which were composite with traditional building materials and combined with building facilities, and the existing typical application methods were expounded through cases. Finally, the challenges and prospects of the application of phase change materials in architecture were discussed. It can provide reference for the application and research of phase change materials in architecture.

Keywords: phase change energy storage materials; energy saving; buildings