

相变蓄热材料在节能建筑领域的应用与研究进展

张 兵¹ 武卫东^{2*} 常海洲¹

(1.上海理工大学理学院,上海 200093;2.上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093)

摘 要 相变蓄热材料是一种能够储存热能的新型化学材料,通过在特定温度下吸收或放出热量发生物相变化,实现热量的储存与释放。根据化学成分不同将相变蓄热材料分为无机、有机和复合类相变材料,由于存储密度高、热容大和热稳定性较好等优点,相变蓄热材料已在一定范围内应用于建筑节能领域。介绍了相变材料的种类、特性以及蓄能机理,分类归纳了相变蓄热材料在建筑物围护结构和建筑物中制冷供暖系统中的应用,包括蓄能墙体、蓄能地板、蓄能屋顶、相变蓄热集热器、相变热泵供暖系统、相变制冷系统、相变冷却吊顶等。并结合目前研究现状分析了相变蓄热材料在研制和应用过程中存在的一些问题,最后,展望了相变蓄热材料在建筑领域的发展方向和应用前景。

关键词 相变蓄热材料,建筑节能,制冷供暖系统,应用

Progress on application and research of PCHSM in energy-saving building

Zhang Bing¹ Wu Weidong² Chang Haizhou¹

(1.College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;
2.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093)

Abstract The phase change heat storage material(PCHSM) is a new kind of chemical material that can store heat energy. By absorbing or releasing the heat of the physical phase at a specific temperature, the heat storage and release can be realized. According to different chemical compositions, PCHSM are classified into inorganic, organic and composite phase change materials. Due to high storage density, large heat capacity, and good thermal stability, it has been used in the field of energy saving in a certain range. The types, characteristics and energy storage mechanism of phase change materials were introduced. And the application of PCHSM in building enclosure structures and building refrigeration heating systems were classified and summarized, including energy storage walls, energy storage floors, energy storage roofs, phase change thermal storage collectors, phase change heat pump heating systems, phase change refrigeration systems, phase change cooling ceilings, etc. Combining with the current research status, some problems in the development and application of PCHSM were analyzed. Finally, the development direction and application prospects of PCHSM in the construction field were prospected.

Key words phase change heat storage material, building energy efficiency, refrigeration heating system, application

相变蓄热技术主要是利用相变蓄热材料(PCMs)进行能量储存与释放,被认为是一种高效、绿色、节能的能量利用方式。我国太阳辐射能丰富且持续时间长,长江以南地区每年能持续 6~8 个月,以北地区也有 4~6 个月。将 PCMs 应用到节能建筑领域中能有效降低我国建筑能耗,缓解能源压力,减少环境污染。当前 PCMs 在航空航天、医学、电子行业等领域都有应用研究,取得了较好的应用效果^[1-3]。

PCMs 的研发和应用,从最初的纯溶液发展到

二元溶液,再到三元溶液,到现在的复合 PCMs。自从美国太阳能公司首先展开将相变材料与建筑基材相结合后,相变材料与建筑的关系逐渐紧密。我国研究相变材料的起点较晚,且主要研究的材料是 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。张正国等^[4]针对移动通讯基站无人机房房温问题,以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 作为 PCMs,对相变温度、储热密度和导热系数等进行优质改良实验,成功解决了无人机房房温难控的问题。章学来等^[5]针对脂肪酸类复合相变材料普遍存在热导率

基金项目:国家自然科学基金(51676129)

作者简介:张兵(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为相变蓄能技术。

联系人:武卫东(1973-),男,教授,主要研究方向为制冷与低温工程。

低的难题进行系统研究,较好地改善了脂肪酸类复合相变材料存在的低导热率问题。蒋希芝等^[6]以 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为主要相变材料,成功研制出一种农用低温 PCMs,为农业温室大棚的有效蓄能开辟了一条新途径。

相比于其他储能材料(如水、岩石等),PCMs 有两个主要优点,一是单位面积 PCMs 蓄能量大,二是 PCMs 的融化温度和结晶温度相接近,这使得它们非常适用于空间的加热/冷却应用。笔者是在蓄热材料成功运用案例的基础上,归纳总结了蓄热材料在建筑结构和建筑物制冷储热系统中的运用进展,并展望了蓄热材料在房屋建造中新的运用发展方向。

1 建筑 PCMs 分类及蓄热性能

目前市场已知用于科学研究及工程应用的相变材料有 20000 多种,根据材料元素可以分为无机类、有机类和复合类相变材料,根据相变温度分为低温 PCMs、中温 PCMs 与高温 PCMs。对节能建筑而言,选用的 PCMs 相变温度处在中低温端,这类材料常见有熔融盐^[7]、石蜡^[8]及脂肪酸^[9]等普通建筑热能储存方式分为 3 种,分别是显热蓄热、潜热蓄热和热化学蓄热。其中潜热蓄热又称为相变蓄热,是蓄热材料在气-液-固之间相互转换时,吸取或散发热能。水由液态到固态相变焓高达 335kJ/kg,实践证明:水在固液态相变过程中吸收/释放的相变焓相当于 1kg 液态水(0℃)升温到 80℃/降温到 0℃固态冰所需要的能量,PCMs 具有巨大蓄能和调节室内舒适度的能力。

2 PCMs 在建筑围护结构中的应用

2.1 相变蓄热地板

相变蓄热地板是一种新型节能地板,具有结构简单、环保和健康等众多优点,相比传统暖气片,复合相变蓄热地板具有很多优势,是一种比较新颖的建筑储能方式。我国超低能耗示范楼^[10]就是利用固定形状的储能原材料填充到普通建筑地板内,白天温度较高时经玻璃幕墙和窗扇射入房屋内的太阳辐射热能被存放在地板相变蓄能材料中,晚上环境温度较低,相变材料发生相变向房屋内释放白天贮存的热能,以此来减弱房屋环境温度波动范围,实际结果显示,使用蓄热地板能将室内温度波动控制在 6℃ 以内。Royon 等^[11]发现轻型建筑构件热容量低,在夏季难以获得最佳热舒适状况,设计了尺寸为

28cm×28cm×3.75cm 的混凝土地板,在水平地板侧面打造 8 个直径 2.5cm,长度 28cm 的圆柱体空腔,然后将 PCMs 引入空腔中,并对蓄能地板进行加热-冷却实验,相对于普通地板,相变蓄能地板降低了约 2℃ 的房屋环境温度,且提高了建筑内部的热舒适性能。

2.2 相变蓄热屋顶

谢尚群等^[12]制备了石蜡/膨胀珍珠岩复合相变蓄能材料,将其加入到建筑砂浆中,并运用到建筑屋顶,结果显示该建筑屋顶在减弱室内外传热和导热能力的同时,也维持了较好的室内温度波动范围。郑雨蒙等^[13]对石蜡玻璃屋顶进行二维数值模拟分析,与传统空气玻璃屋顶相比,含石蜡玻璃屋顶在大庆地区夏季、过渡季和冬季的节能率分别为 26.64%、59.57%和 3.22%,并且推荐大庆地区采用这种含石蜡的玻璃屋顶厚度应该在 9~12mm 范围内。Kosny 等^[14]为了减轻屋顶热桥质量和减少屋顶产生的热负荷,设计出一种光伏-相变材料(PV-PCM)屋顶,其中包含了相变材料散热器、通风空腔和隔热材料等,相对于普通房屋屋顶,这种 PV-PCM 屋顶房屋在冬季可减少建筑 30% 的热负荷,在夏季可减少 50% 的冷负荷。这种蓄热屋顶有较好的储能效果,但目前还难以做到广泛应用,主要存在承压能力小、通风效果差等问题。

相变材料也有被用于装饰天花板,如华盛顿大学的分子工程大楼^[15],其天花板采用的相变材料是一种无毒植物凝胶,装在塑料小方格中,安装在办公区天花板上,这种蓄热天花板在屋顶 23℃ 左右吸收热能融化,并在相同的温度下冻结,从而抑制了室内温度波动,使被动冷却空间更加舒适。

2.3 相变蓄热墙体

相变石膏墙体。石膏作为一种常用建筑材料对工程应用具有一定的指导作用,将相变蓄热材料与石膏混合制成的相变复合材料应用于建筑墙体,让建筑围护结构在拥有调湿性能的同时又拥有调温特性。Becker^[16]在外墙内侧粘贴相变石膏板对地中海气候区轻质建筑 and 传统实体建筑进行研究,结果显示,在地中海气候区相变石膏板在轻质建筑中应用效果最佳,节能率可达 57%,且认为其应用应考虑建筑类型并结合夜间通风。

相变 Trombe 墙体。一种自然通风的相变 Trombe 墙^[17]工作原理是:夏季白天较热时,打开太阳集热墙顶部的出风口,相变 Trombe 墙吸收围护结构中太阳辐射能,蓄热材料发生融化,同时热压作

用驱动背阳面冷风流动,使室内空气通过太阳能通风通道不断向室外排出,加强室内换气,顺便携带出室内和围护结构中的热能,同时相变墙贮存冷量。冬季关闭室外通风口,相变 Trombe 墙吸收太阳辐射,太阳墙加热的空气直接通过连接室内的风口送入室内,形成热空气的室内循环,同时蓄存热量。而在初冬气温较高时,开启相变 Trombe 墙底部通风口,热墙吸收太阳辐射热量加热太阳能通道空气,在热压作用下驱动室内空气流动形成完全新风循环。

2.4 相变蓄热表面涂料

根据热能传热方式,涂料分为阻隔型^[18]、反射型^[19]和辐射型^[20],其中在节能建筑领域采用较多的是阻隔型与反射型涂料。张璐丹等^[21]利用研制的相变微胶囊与立邦涂料按 1:1 混合,并在两个相同的房间进行了比较实验,一房间墙内部粉刷约 3mm 厚的相变微胶囊混合涂料,另一房间内部粉刷约相同厚的立邦涂料,结果发现,相变微胶囊混合涂料房间的最大空气温度比立邦涂料房间的下降 6℃,最小温度要高 2.2℃,最大节能效率达到 26%。杨保平等^[22]以 2,4-甲苯二异氰酸酯和四乙基戊胺为壁材,制备出相变温度为 19.2℃,相变焓为 65.5 kJ/kg 的微胶囊,并将其混入防腐涂料中,实现了防腐涂料具有防腐性能的同时还有一定的温度调节性能。相变微胶囊在涂料中表现出较好的控温效果,同时由于制备过程复杂,价格高昂是目前遇到的难题,严格限制了相变微胶囊涂料在工程中的应用。

3 相变蓄热材料应用于建筑物制冷供暖系统

3.1 相变蓄热与供暖结合

相变热泵系统。刘旭飞等^[23]针对于我国广大北方寒冷地区,提出了一种新型低环境温度空气源热泵系统,在全工况范围内新型制热性能系数 COP,在环境温度为 15℃ 时,系统 COP 为 4.8,环境温度为 -30℃ 时,系统 COP 为 1.8,提高了空气源热泵在低温环境下的运行能效,实现了热泵机组在寒冷地区稳定、安全与经济运行。PCMs 与热泵系统相结合,具有高效、无污染的特点,但初始投入资金大、维修难度高和体积大等因素成为相变热泵系统应用的软肋。

相变辐射采暖。吕石磊等^[24]发明了一种全封闭式热辐射地暖管,该地暖管电容外管和内管之间填充有 PCMs,在室温过高时,吸收室内多余的热量,在室温偏低时,释放出储存的热量,实现了冬季供热时移峰填谷及建筑自动调节室温的作用。Jin

等^[25]设计出同时拥有供暖和供冷能力的地板辐射采暖系统,在该系统中安装有双层蓄能地板,且双层蓄能地板拥有不同的相变温度,分别用于系统的蓄冷和蓄热,研究发现,与不含相变材料的地板辐射系统相比,该系统释放的热量或冷量将分别多出 41.1% 和 37.9%。

相变蓄热式集热器。华维三等^[26]针对现有真空管式太阳能热水器水箱体积庞大的缺点,提出一种新型无水箱相变蓄热式太阳能集热器,其工作原理是太阳能真空集热管经太阳辐射后温度上升,同时将得到的热能传递给填充于其内的相变储热球。制取热水时,冷水与相变储热球进行热交换,热交换完成后,热水由热水出水口导出。在夜晚或阴雨天,真空集热管不能从室外环境吸收热量,则通过太阳能真空管内置的电加热棒或相变储热球所储存的潜热释放热量,从而保证热水连续 24h 供应。与没有添加相变储热球的太阳能集热管相比,新型无水箱相变蓄热式太阳能集热器蓄热量增加了 43.8%。

3.2 相变蓄热与空调制冷结合

相变制冷系统。崔明辉等^[27]以集热器为研究对象,对无外加热源的太阳能吸收式制冷系统进行改进,建立集热蓄热一体化模型,显著提高了太阳能制冷系统中各项参数的性能,集热效率提高约 7.62%,系统 COP 增加约 23.60%。Bejarano 等^[28]将现实需求与低成本相结合,提出一种基于 PCM 的新型热储能系统(TES),该系统填充床内含有大量的相变微胶囊,当制冷剂流动时,制冷剂吸收相变微胶囊中的热量而蒸发,提高了系统能效比。PCM 与太阳能空调的联合可以缓解甚至解决太阳能空调运作的间断性及太阳能产生与使用时间不匹配的问题。

相变蓄冷吊顶。张群力等^[29]根据毛细管网格栅吊顶辐射供冷系统的优点,开发出了新型相变材料蓄能的毛细管网格栅吊顶,通过对新型相变材料蓄能式吊顶物性、几何参数及热性能等综合影响因素的分析,结果发现该新型吊顶 60% 以上的冷量可用于日间供冷,而普通蓄能式吊顶的冷量散失较大,只有 26% 的冷量用于白天供冷。

4 结语

综述了相变蓄热技术在节能建筑领域的应用,包括相变蓄热地板、相变蓄热墙体与屋顶、相变表面涂料和相变蓄热供暖制冷系统;蓄热地板在一定程度上可以调节室温,减少室内温度波动。相变蓄热墙体可以结合太阳能通风达到建筑物调湿调温的目的。

的。相变蓄热供暖制冷系统可以提高制冷系统性能参数,缓解甚至解决太阳能空调运行的间断性及太阳能产生与使用时间空间不匹配的问题。

相变蓄热材料能够充分利用太阳能资源,降低建筑能耗,符合我国节能减排及打造绿色青山的基本国情。但仍有一些技术和应用上的问题亟待解决:(1)PCMs 本身物性,如相变材料本身体积变化、疲劳强度和寿命等问题;(2)经济性,市场上相变材料的价格与封装技术成本较高,从而致使整体应用费用偏高等问题;(3)地域性,我国地域辽阔,不同地域性能参数不一,需要重新考量相变材料;(4)环保性,品质生活是大众所希冀的,吸声降噪、灭菌防潮、抗震抗压等都是相变材料需要考虑的问题。

结合国内外应用现状来看,相变蓄热材料的性能并不十分理想。这里,笔者对相变蓄热材料今后的发展或研究方向提出以下几点建议:

(1)在相变材料选择方面,多采用绿色可降解的相变材料,在互溶的条件下,制备出高蓄能量、导热率大、抗压能力强的多元复合型蓄能材料。

(2)优化实验过程,减少制备步骤,同时增强蓄能材料的热力循环性能与封装材料的可靠性,降低投入成本。

(3)应用过程中,相变材料的加入能够在降低建筑能耗的同时,应不影响建筑物本身的力学性能(如新型高强度吸附载体材料、合适的相变材料掺入量等),同时可结合建筑美学需求,进一步加大此方面的研究。

参考文献

- [1] 张继皇,薛祝亮,杨强,等.相变蓄热技术在商业建筑供暖中的应用[J].供热制冷,2017(2):28-31.
- [2] Genc M, Genc Z K. Microencapsulated myristic acid-fly ash with TiO_2 shell as a novel phase change material for building application[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 131(3): 2373-2380.
- [3] 郭军红,邵竞尧,包雪梅,等.吸波-相变微胶囊/环氧树脂红外微波隐身涂料[J].涂料工业,2017,47(11):28-35.
- [4] 刘欣,张正国.十水硫酸钠相变蓄热材料的改性及其在模拟机房中的应用[D].广州:华南理工大学,2013.
- [5] 陈裕丰,章学来,丁锦宏,等.癸酸/辛酸-纳米复合相变材料的热物性实验研究[J].制冷学报,2017,38(5):41-45.
- [6] 徐磊,蒋希芝,柳军,等.农用低温相变蓄热材料磷酸氢二钠的制备与性能研究[J].江苏农业科学,2017,45(10):199-201.
- [7] 尹辉斌,王文豪,陈昌杰,膨胀石墨/硝酸熔融盐复合相变材料的制备及热物性[J].广东化工,2017,44(22):16,33-34.
- [8] Zheng H, Wang C, Liu Q, et al. Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 372-381.
- [9] 李琳,李东旭,张树鹏,等.脂肪酸/ SiO_2 复合相变材料的制备和性能[J].材料研究学报,2017,31(8):591-596.
- [10] 谢士涛,曾晓武.超低能耗示范楼建筑幕墙技术研究[J].住宅产业,2009(9):75-77.
- [11] Royon L, Karim L, Bontemps A. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings[J]. Energy and Buildings, 2013, 63: 29-35.
- [12] 谢尚群,孔祥飞,何金棋,等.复合相变蓄能屋顶的制备及性能研究[J].墙材革新与建筑节能,2017(7):47-52.
- [13] 郑雨蒙.严寒地区含相变材料玻璃屋顶光热性能研究[D].大庆:东北石油大学,2017.
- [14] Kosny J, Biswas K, Miller W, et al. Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink[J]. Solar Energy, 2012, 86: 2504-2514.
- [15] 郭娟利,徐贺,刘刚.相变材料与建筑围护结构蓄能一体化设计及应用[J].建筑节能,2017,45(10):38-42.
- [16] Becker R. Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials[J]. Journal of Building Physics, 2013, 37(3): 296-324.
- [17] 王源霞.太阳能通风结合相变墙体在夏热冬暖地区的应用研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [18] 张玲,陈寿,孙耀明,等.FGO-WPUPA 光固化阻隔涂料的制备及其对 PLA 薄膜阻氧性能的影响[J].中国塑料,2017,31(8):35-40.
- [19] Oudard J. Anti reflective coating for photovoltaic glass panel: US, US9242893[P]. 2016-01-26.
- [20] Hsu S Y. Modeling of heat transfer in intumescent fire-retardant coating under high radiant heat source and parametric study on coating thermal response[J]. Journal of Heat Transfer, 2017, 140(3): 032701-032711.
- [21] 张璐丹,韩旭,李永.相变微胶囊涂料在建筑中应用的节能分析[J].建筑节能,2017,45(11):46-48.
- [22] 杨保平,席满意,崔锦峰,等.相变微胶囊的制备及其在涂料中的应用研究[J].当代化工,2014,43(1):32-35.
- [23] 刘旭飞,宋建成,耿蒲龙,等.相变蓄热蒸发型空气源热泵控制系统的开发[J].暖通空调,2017,47(3):95-100.
- [24] 吕石磊,唐晓磊.一种全封闭式蓄热型地板辐射采暖管.中国:CN206469329U[P]. 2017-09-05.
- [25] Jin X, Zhang X. Thermal analysis of a double layer phase change material floor[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(10): 1576-1581.
- [26] 华维三,章学来,刘锋,等.新型无水相变蓄热式太阳能集热器及热性能研究[J].可再生能源,2017,35(3):395-400.
- [27] 崔明辉,孟德志,夏昌浩,等.基于 MATLAB 改进的相变蓄热集热器在太阳能制冷系统中的性能分析[J].河北工业科技,2017,34(1):23-29.
- [28] Bejarano G, Suffo J J, Vargas M, et al. Novel scheme for a PCM-based cold energy storage system. design, modelling, and simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 256-274.
- [29] 张群力,狄洪发.相变材料蓄能式吊顶辐射供冷系统热性能模拟研究[J].建筑科学,2012,28(10):88-92.

收稿日期:2018-07-10

修稿日期:2018-08-30