

相变蓄能建筑围护结构热性能研究进展

王馨, 张寅平*, 肖伟, 曾若浪, 张群力, 狄洪发

清华大学建筑技术科学系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: zhangyp@mail.tsinghua.edu.cn

2008-09-01 收稿, 2008-11-17 接受

国家“十一五”科技支撑计划资助项目(编号: 2006BAA04B02, 2006BAJ02A09)

摘要 改进建筑围护结构热性能是建筑节能的重要途径. 相变蓄能建筑围护结构对于有效利用可再生能源, 降低建筑运行能耗, 节省运行费用, 提高建筑热舒适度, 减小环境污染和温室气体排放具有重要意义. 介绍了理想节能建筑围护结构概念, 以此指导建筑围护结构材料遴选和热性能设计; 对国内外相变建材和相变蓄能围护结构的研究进展进行了综述, 并指出了需要解决的问题.

关键词
相变材料
蓄能
热质
围护结构
建筑节能

随着我国经济发展和人民生活水平的提高, 我国建筑能耗增长迅速, 统计数据显示, 2004 年我国建筑总面积为 389 亿平方米. 建筑能耗占社会总能耗的 25.5%^[1], 建筑节能刻不容缓. 在国务院批准的《节能中长期专项规划》中, 建筑节能已被列为节能的重点领域.

建筑围护结构作为室内外环境的分界面, 在提供安全、隐私、出入口和视域的同时, 调整着各种形式的能量(光、热、声、湿等)流通. 具体说来, 围护结构在建筑使用过程中承担的功能主要有视野、采光、遮阳与隔热、保温(散热)、通风和隔声等六大方面. 改进建筑围护结构形式与热性能, 是建筑节能的重要途径.

人类社会在几千年的发展过程中, 绝大部分时间都采用被动式手段来调节室内热环境, 如冬季利用太阳能采暖, 夏季利用自然通风“空调”. 被动式调节的特点是依靠建筑围护结构自身的调温特性, 充分利用外环境自然调节改善室内环境. 这类传统建筑大都使用重质材料建造, 热惯性较大, 能有效抑制室内温度波动, 冬暖夏凉, 如陕北地区的窑居建筑^[2]. 目前现代建筑尤其是高层建筑中, 轻质围护结构应用越来越广泛, 可大大减轻建筑结构自重, 且大都具有良好的保温隔热性能. 同时, 出于景观和自然采光

的需要, 现代建筑经常采用大面积的透明围护结构, 冬季利用从玻璃进入室内的太阳辐射热采暖. 但是由于轻质围护结构热容小, 易造成室内温度白天过高、夜间过低, 昼夜波动大, 热舒适性差. 如何充分地利用建筑围护结构热质(thermal mass), 依靠建筑围护结构自身的调温特性, 充分利用可再生自然能源而不采用(或少采用)附加能源达到人体热舒适要求, 对有效利用清洁廉价的可再生能源, 降低建筑运行能耗, 节省运行开支, 减小环境污染等具有重要意义. 为此, 国际能源署(IEA)下属机构 ECES (Energy conservation through energy storage) 已将储热在建筑中的应用作为主要的研究方向.

1 理想节能建筑围护结构

影响室内空气温度的主要因素有: (i) 室外环境参数(室外温度、风速、辐照、天空温度); (ii) 围护结构热性能(热阻特性、热容特性); (iii) 室内热扰与换气; (iv) 室内辅助调温手段(如空调或采暖)等. 在其他条件给定的情况下(气象条件、换气次数、房间尺寸和墙体厚度等), 室温和建筑围护结构材料特性紧密相关.

1.1 理想节能建筑概念

图 1 为某建筑全年室内外空气温度变化示意图,

由于围护结构的蓄热,与环境温度相比,室温的日波动和年波动都有衰减和延迟现象.文献[3]提出了理想节能建筑围护结构概念,即如果建筑围护结构的蓄热和隔热性能对室外温度波动产生合适的衰减和延迟作用,不用采暖和空调即可使室温处于舒适温度区,这样的建筑称为被动式理想节能建筑,这样的围护结构称为被动式理想节能建筑围护结构.

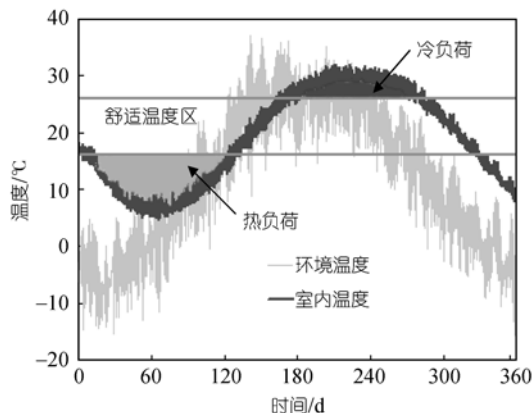


图1 某建筑室内外温度示意图

一般说来,建筑热舒适性和能耗密切相关,图2为采用不同围护结构的建筑能耗与舒适性的关系示意图.可见,理想节能建筑意味着仅用自然能源即可使建筑位于舒适区,即建筑围护结构性能曲线必须能够落在区域A中.要达到这个目标,除了通过各种方式充分利用太阳能、夜间冷风能等自然能源外,还需使用热性能好的建筑围护结构.

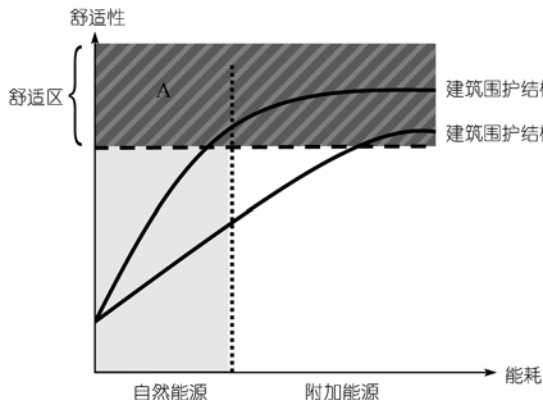


图2 建筑能耗与舒适性关系示意图

传统建筑围护结构热性能分析一般采用正问题分析方法,即在已知建筑围护结构形式、材料和热物

性的前提下,分析其热性能,并以此为基础,得到相应的采暖空调负荷,确定采暖空调方式.这种正问题的分析方法难以确定建筑的最佳围护结构形式、材料的最佳热物性和采暖空调的最佳方式.而理想节能建筑从反问题角度研究如何依靠建筑围护结构自身热质的调温特性,充分利用自然调节即可再生自然能源以达到不采用(或少采用)附加能源满足人体热舒适的要求,通过建筑围护结构热质线性和非线性节能调温原理分析,确定建筑的最佳围护结构形式、建材的最佳热物性及适用条件和范围,是建筑围护结构和建材的热物性设计与研制的一个新的尝试方向.

1.2 理想节能建筑评价参数

为了评价无采暖空调建筑的热舒适性,文献[3]以房间全年的自然室温为对象,定义了夏季过热不舒适度 I_{sum} 和冬季过冷不舒适度 I_{win} .

$$I_{\text{sum}} = \int_{\text{year}} (T_{\text{in}} - T_{\text{H}}) d\tau \quad T_{\text{in}} > T_{\text{H}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{win}} = \int_{\text{year}} (T_{\text{L}} - T_{\text{in}}) d\tau \quad T_{\text{in}} < T_{\text{H}}, \quad (2)$$

其中, T_{in} 为室内操作温度, T_{H} 和 T_{L} 分别为热舒适区温度的上下限.

可见, I_{sum} 和 I_{win} 越小房间越舒适.当 I_{sum} 和 I_{win} 等于或接近0时,不需采暖空调即可维持热舒适性,即为被动式理想节能建筑.

1.3 建筑围护结构热性能

非透明围护结构控制方程可表示为

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3)$$

其中,线性常物性材料的焓表示为 $H = \int_{T_0}^T c_p dT$,非线性相变材料的焓表示为 $H = \int_{T_0}^{T_L} c_{p,s} dT + \int_{T_L}^{T_H} c_{p,m} dT + \int_{T_H}^T c_{p,l} dT$, T 为材料在 τ 时刻的温度, T_0 为焓值为0时的温度, T_L 到 T_H 为相变温度范围, ρ 为密度, k 为导热系数, c_p 为比热.

围护结构控制方程结合边界条件和初始条件以及室内空气热平衡方程,构成非透明围护结构焓法传热模型.由此可得到^[3]

$$\rho c_p = f(ACH, t_{\text{in}}, k), \quad (4)$$

其中, ACH 是室内换气次数.

Zhang等人^[3]利用此模型对北京地区给定常物性材料对象房间进行了研究, 在外墙 $k = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 内墙 $k = 0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 情况下, 当 ρc_p 大于 $50 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 时, I_{win} 接近 0, 即冬季可达到被动式理想节能建筑; 当 ρc_p 大于 $100 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 时, I_{sum} 和 I_{win} 都接近 0, 即全年可达到被动式理想节能建筑.

现有建材多为常物性材料, 其热容 ρc_p 的值在 $0 \sim 4.0 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 的范围内^[3], 远达不到被动式理想节能建筑围护结构所要求的热容. 而相变材料在相变过程中可吸收或放出大量的热量, 在相变温度附近的等效比热很大, 其热性能更接近理想节能建筑要求.

2 相变材料与相变建材

常见的相变蓄能材料种类及特点见表 1^[4].

目前适用于建材用的商业化相变材料产品大都为石蜡和水合盐. Khudhair等人^[5]给出了建筑蓄能常用的无机和有机相变材料. 一般说来, 无机相变材料价格较便宜, 有机相变材料价格较贵. 由于传统固液相变材料使用时需封装, 在建筑中应用较困难, 不少研究者对材料进行了研究与改进. Hawlader等人^[6]研究了各参数对微封装相变材料性能(如封装效率、蓄放热量等)的影响. Hawes和Feldman等人^[7,8]综述了有机相变材料在各种建筑水泥中的吸收特性和吸收机理, 分析了温度、湿度、黏性、吸收面积和压力等因素对吸收特性的影响. Hawes等人^[9,10]研究了有机相变材料在各种建筑水泥中的稳定性, 指出相变材料渗入水泥中, 能显著提高墙体的储热能力, 但其长期稳定性和现有水泥的吸收特性有待进一步改善. 美国学者^[11]根据Florida的气候条件研究了几种可用于石膏板的储热材料, PCM主要是硬脂酸甲脂、硬脂酸丁脂、棕榈酸甲脂以及它们的混合物, 这些物质有较高

的相变潜热, 可以获得一系列不同相变温度的PCM. 但是在比较炎热的气候条件下, 它们的相变温度范围仍然不能很好地适应人居建筑所需要的温度. 德国BASF公司(<http://www.basf.de/dispersion>)将石蜡封装在微胶囊中, 研制出石蜡砂浆, 并已将这种砂浆用于房屋的内墙表面上, 作为室内的冬季保温和夏季制冷的材料, 这样的设计可以减少室内温度波动, 使室内保持良好的热舒适度, 减少空调系统的设备容量, 转移用电负荷. 砂浆内含 10%~25%(质量分数)的石蜡微胶囊, 也就是说, 每平方米的墙面就含有 750~ 1500 g的石蜡微胶囊. 每 2 cm厚的此种砂浆的蓄热能力相当于 20 cm厚的砖木结构.

近几年出现的一种定形相变材料(shape-stabilized PCM)^[12~14], 是由相变材料(芯材)和高密度聚乙烯作为支撑材料(囊材)构成. 在微观尺度内高密度聚乙烯将定形相变材料包裹交联起来, 由于囊材的熔点较高形成空间网状结构, 对作为芯材的相变材料起着微封装和支撑作用. 当工作温度低于高分子囊材的熔点时, 即使相变材料芯材发生固-液相转变过程, 相变材料依旧被包裹在囊材中, 可以维持形状不变. 此材料可制成粒状、棒状, 也可制成板材, 适合在建筑中直接应用或者与混凝土掺混使用.

由上可见, 目前已经形成了一些比较成熟的相变材料与普通建筑材料的复合使用方式. 但仍存在一些问题, 如: 相变材料成本过高、相变材料与普通建材复合使用过程中存在力学强度降低问题、阻燃问题、相变复合建材的规模化生产工艺问题等.

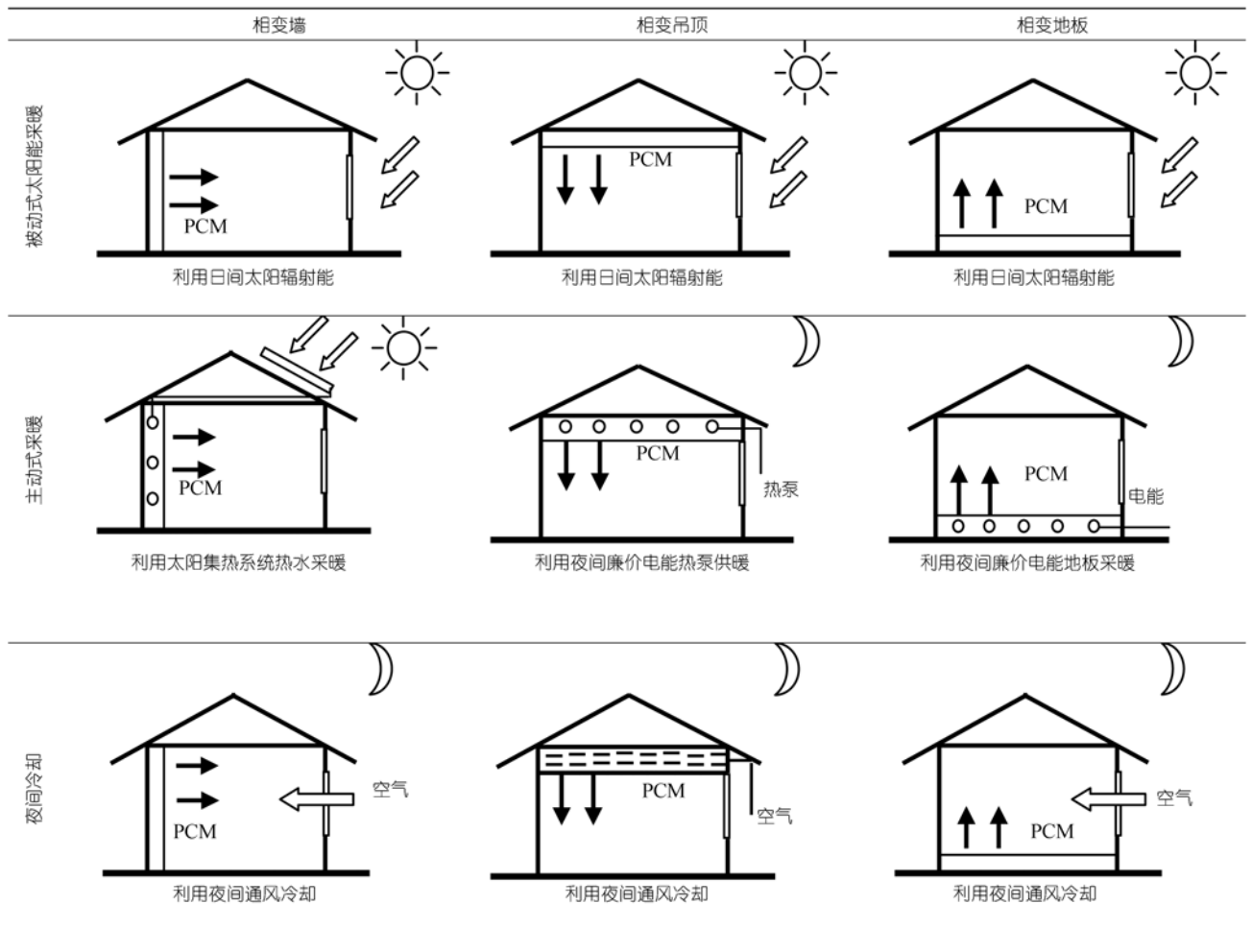
3 蓄能式相变建筑围护结构

将相变材料复合到现有建材中, 可以在建筑承重增加较小的条件下有效增大建筑热惯性, 减小室内温度波动, 改善房间热性能^[15~17]. 按照蓄能的方式

表 1 相变材料分类及其优缺点比较^[4]

分类	无机材料	有机材料
种类	结晶水合盐类、熔融盐类、金属或合金类等结晶水合盐类	高级脂肪烃类、脂肪酸/酯类或盐类、醇类、芳香烃类、芳香酮类、酰胺类、氟利昂类、多羟基碳酸类等、一些高分子类
优点	导热系数大、单位体积的储热密度大、价格便宜、不可燃	在固体状态时成型性较好、一般不容易出现过冷现象和相分离、材料的腐蚀性较小、性能比较稳定、毒性小
缺点	过冷、易相分离、腐蚀性大	导热系数小、密度小、熔点较低, 不适于高温场合中应用, 且易挥发、易燃烧甚至爆炸或被空气中的氧气缓慢氧化而老化
性能改进	解决过冷: 加成核剂、冷指法; 解决结晶: 加增稠剂、加晶体结构改变剂、盛装相变材料的容器采用薄层结构、摇晃或搅动	通过添加高导热系数材料提高相变材料的导热系数; 通过添加阻燃剂或封装的方法改善相变材料的易燃性能

表 2 相变蓄能构件多种应用形式



可分为被动蓄能式相变建筑围护结构和主动蓄能式相变建筑围护结构。被动蓄能式建筑围护结构主要依靠室温的变化或接受太阳辐射热流等方式吸收和释放热量，主动蓄能式建筑围护结构则把相变材料建筑构件与采暖空调末端形式有机集成在建筑围护结构内，相变材料的吸放热过程可以通过换热装置主动地进行调节与控制。表 2 给出了相变蓄能构件的多种应用形式。

合理优化配置建筑围护结构热质和蓄放热能力，可以解决建筑物能量供需双方在时间和使用强度上不匹配的问题，起到如下作用：(i) 与太阳能或夜间冷风等蓄热或蓄冷方式结合，充分利用可再生能源，降低建筑能耗；(ii) 提高室内热环境稳定性，减少室内温度波动，增加室内环境舒适性；(iii) 对建筑的采暖空调负荷起到削峰和延迟作用，从而有助于减少空调机组和供暖设备的装机容量。

3.1 被动蓄能式相变建筑围护结构

诸多学者对无内热源的被动蓄能式相变建筑围护结构(墙体、地板、吊顶)的蓄能调温特性和应用可行性进行了研究。

Chandra等人^[18]计算了相变储能墙板的厚度对室内温度变化的影响，以及各类构件如屋顶、南墙、北墙和西墙各处热流量的变化。计算结果显示 5 cm 的相变储能墙板的热效果与 23 cm 的混凝土墙板相当；并且相变储能墙板用在南面墙体效果最好。

Neeper等人^[19]对相变墙体的一维非稳态传热过程进行了理想简化，忽略相变墙体的热阻影响，分析室内温度在周期性波动和实际室温波动工况条件下，相变墙体的蓄传热能力。结果表明即使墙体没有导热热阻，由于墙体表面对流热阻和外界条件的限制，墙体的最大吸热量在 300~400 kJ/m²；最佳相变温度

为房间平均舒适温度. 他建立的这种方法为优化选取相变温度和估算相变材料在不同使用量下的使用效果提供了参考.

林坤平^[20]建立了相变墙体蓄热过程和放热过程的简化分析模型, 得出了相变外墙的蓄传热特性. 研究发现和普通内墙传热过程相比, 相变外墙的蓄传热过程更为复杂, 传统的墙体的热性能评价参数(衰减系数和延迟时间)不能够完全反映相变墙体的传热特性, 为此补充了热流修正因子和相变传热过程时间两个参数用于反映相变墙体的传热过程特性.

Peippo 等人^[21]在美国威斯康星州麦迪逊地区建立一座 120 m² 的轻质被动式太阳房(具有较好保温性能和较大的南向窗户)中, 将相变材料墙板作为该房间的热存储构件. 研究发现该房间在一年内可以节省 3 GJ 的热量或节省 15% 的年运行能耗费用, 同时发现日存储过程中的最优相变温度比室内温度高 1~3°C.

美国 Oak Ridge 实验室的 Stovall 和 Tomlinson^[22]的分析表明相变石膏墙板的成本比普通石膏墙板增加约 1.30 美元/m². 对于北美常见的房子如果采用相变石膏墙板用于辅助冬天采暖, 在经济性上以热泵作为比较, 采用相变墙的投资回收期约为 5 年. 通过模拟得出, 对于类似美国田纳西州气候类型的地区, 使用相变墙板能使采暖设备容量选型减少 1/3, 而对于类似丹佛气候类型的地区, 使用相变墙板能使采暖设备容量选型减少 1/2.

Ismail 与 Castro^[23]在 1997 年采用商用多元醇的混合物制作 PCM(相变温度是 23~26°C), 建造了一个 1.25 m(长)×1.8 m(宽)×1.7 m(高)的坡屋顶实验测试房, 经过两年测试, 并利用一维非稳态传热模型进行了数值模拟. 结果表明采用 PCM 后, 空调负荷可以减少 25%~30%, 并可以明显转移峰值空调负荷.

加拿大 Concordia 大学的建筑研究中心的 Athienitis 等人^[24]在被动式太阳房中使用相变墙, 结果显示房间的温度在白天比常规墙板房间温度低 4°C, 而夜间其放热可以延续 7 h 以上, 夜间相变墙板的表面温度可比普通墙板高 3.2°C, 相变材料凝固过程放出的热量相当于总供热负荷的 15%, 可在很大程度上改善房间热舒适性.

Kang 等人^[25]提出了一种结合夜间通风的新型储能系统, 堆积床式相变吊顶系统(NVP system), 其换热面积大, 蓄/放热效率高, 夏季降温效果好.

林坤平等人^[26,27]分析了采用相变墙建筑适用的

气候条件, 并通过数值方法模拟和评价了相变墙房间在我国不同气候地区的使用效果, 说明了相变墙建筑在我国不同地区使用的优点和局限性, 并对给定的气象条件和相变墙房间, 讨论了夏季“空调”型相变墙的优化设计方法.

Zhang 等人^[28]设计了一种相变节能型墙体, 将石蜡材料经过宏观封装成圆柱嵌入在框架墙体中, 现场测试结果表明该墙体用于民用建筑中可以降低墙体壁面峰值热流的 38%, 将日间的部分负荷转移到夜间, 维持相对较稳定的室内温度, 减少设备的启停次数.

张寅平等模拟研究了直接受益式定形相变墙板和地板房间的热性能^[29,30], 从相变温度、潜热、导热系数、对流换热系数、相变板厚度、相变板放置位置、保温形式等几个方面分析了其使用效果, 研究结果表明对流换热系数对使用效果影响很大. 相变温区越窄, 使用效果越好; 相变石膏板和定形相变墙板分别使室温波动减小了 46% 和 56%^[31].

综上所述, 相变蓄能建筑围护结构能增加轻质建筑围护结构的热容, 增加外围护结构的热惰性, 减少室内温度波动, 降低室内空调负荷.

3.2 主动蓄能式相变建筑围护结构

主动蓄能式建筑围护结构内部可布置一些热源或换热装置, 如预设电热型电缆或电热膜、预埋水管或风管等, 有利于充分利用可再生能源, 节省运行费用, 增大室内热舒适性. 从蓄存能量的用途角度, 可分为主动式相变蓄热和主动式相变蓄冷.

(i) 主动式相变蓄热. 主动式相变蓄热研究主要集中在地板采暖上, 根据采暖热源不同, 可分为相变蓄能电采暖和相变蓄能太阳能采暖; 根据传热介质不同, 又可分为直接相变蓄能电采暖、相变蓄能热水采暖和相变蓄能热风采暖.

(1) 直接相变蓄能电采暖. 直接相变蓄能电采暖由于简单易行, 受到较多学者的关注.

Barrio 等人^[32]采用 NPG 固相变材料作为地板蓄能材料, 利用夜间低谷廉价电采暖, 显示了固相变材料的可行性. Athienitis 等人^[33,34]研究了混凝土蓄热地板电采暖系统的热性能和使用效果, 同混凝土相比, 相变材料具有单位蓄能密度大的特点.

叶宏等人^[35~38]提出将定形相变材料与电缆加热的地板电采暖结合使用, 并对该系统进行了实验和

模拟研究. 研究结果表明熔点在 32°C 左右的定形相变材料是该系统较理想的贮热材料, 全天室内空气温度可维持在 $21\sim 25^{\circ}\text{C}$, 具有很好的热舒适性; 该系统在实行昼夜电价分时制的地区具有较好的应用前景. 罗晓熹等人^[39]介绍了电加热相变蓄热地板供暖的优点, 综合考虑室外气象因素、室内辐射特性和相变材料自身的热物性, 建立了电加热相变蓄热地板供暖系统的计算模型, 比较了相变蓄热地板与传统散热器供暖的热舒适性和能耗, 结果表明相变蓄热地板能够改善室内热舒适性和降低能耗.

林坤平等人^[40~43]建立电热膜加热的相变蓄能地板的一维非稳态传热过程的数学模型, 提出了与夜间电采暖相结合的新型定形相变材料地板蓄热系统, 开展了定形相变材料蓄能式电热膜地板采暖系统的实验与模拟研究. 该系统可有效提高和均匀房间温度, 能把白天负荷全部转移到了夜间, 有效利用夜间廉价能源, 实现整个采暖季节夜间蓄能日间供暖的效果. 她们还模拟分析了不同的气候条件下, 相变材料适当的相变温度和相变材料与地板装饰层之间空气层的厚度, 并介绍了该系统简单的设计和控制方法.

Zhou等人^[44]模拟研究了一种结合定形相变蓄能墙板的混合式供暖系统的使用效果. 辅助热源系统白天维持室温在 18°C 以上, 夜间满负荷打开使墙板蓄热. 结果表明, 定形相变板的使用使平段和峰段的耗电量减小了 47%, 总能耗减小了 12%.

由于相变蓄能电采暖消耗的是高品位的电能, 因此只适合于分时电价比较大的地区. 受建筑节能影响, 鼓励采用低品位的能源进行建筑采暖与空调, 因此利用自然能源的主动式相变建筑围护结构受到更多的关注.

(2) 相变蓄能热水采暖. 张群力等人^[45,46]提出了相变蓄能式低温热水地板采暖系统和吊顶采暖空调系统, 建立了系统在室内热环境稳态工况下的传热过程模型, 通过数值模拟方法分析相变温度对地板和吊顶表面平均热流和蓄能比的影响, 比较了定形相变材料与混凝土地板及吊顶热性能差异. 结果表明, 相变材料蓄能效率比混凝土高 $30\%\sim 40\%$, 导热系数影响蓄热效率与蓄热量, 相变温度和潜热影响表面热流量的衰减时间.

(3) 相变蓄能热风采暖. 在相变蓄能热风采暖方面, 林坤平等^[47~50]模拟并实验了地板下送风式定形相变材料蓄能系统. 结果表明, 高峰用电采暖需求可全

部被低谷用电采暖取代, 在采取峰谷电价的地区可以节省费用. 对于不同的气候条件, 可通过调整相变材料的相变温度和送风速率使系统达到供暖需求.

(ii) 主动式相变蓄冷. 主动式相变蓄冷研究主要为结合夏季夜间冷风的相变蓄能式建筑围护结构, 夜间蓄冷供日间空调使用.

康艳兵^[51]把相变材料制作成堆积床形状吊顶与夜间通风相结合, 建立数学模型并对此系统在不同地域的应用效果进行了分析. 结果表明, 在兰州、成都、太原, 此系统可满足房间舒适性要求; 在乌鲁木齐、北京、西安, 要根据用户要求确定系统是否可行; 在广州该系统不可行. 钟志鹏^[52]研究了夏季结合夜间通风的相变墙在不同地区的应用效果, 讨论了通风次数和相变温度的优化设计方法. 结果表明在日差较大, 平均温度较低的气候条件下, 结合夜间通风的相变墙可基本取代空调, 防止夏季房间过热.

瑞典 Climator 公司(<http://www.climator.net>)在 Stevenage Borough 政府办公室安装了一套相变材料蓄能吊顶用于夜间通风冷却, 白天供冷. 测试结果表明可以降低室内温度 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$. 德国 Dörken 公司(<http://www.doerken.de>)于 2003 年将相变材料放置在房间吊顶上进行夜间通风蓄冷、在白天供冷. 该系统采用的无机水合盐类型相变材料相变温度为 $22\sim 24^{\circ}\text{C}$, 潜热为 158 kJ/kg , 相变材料用 $30\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 的铝袋封装. 实验结果表明平均室内温度可以降低 4°C , 最大可降低 5.5°C .

德国 Koschenz 和 Lehmann^[53]提出了一种应用于轻质建筑中的主动式相变蓄能石膏吊顶空调系统. 该系统通过冷水毛细管将冷量夜间蓄存入相变石膏板中, 日间时再释放出冷量, 可以将白天的空调负荷转移到夜间处理. 该系统可以利用低品位能源进行空调采暖, 具有较好的应用前景.

4 结论与展望

通过优化配置建筑围护结构热物性参数, 增强其衰减和延迟作用, 不使用或少采用采暖和空调就可达到舒适温度, 从而成为理想节能建筑围护结构. 这就需要从反问题角度出发, 通过简化与建模, 在气候条件、建筑围护结构和运行工况给定条件下, 得出不用或少用附加能源时围护结构所需要的临界热性能, 从而为建材热物性从需求角度提出了改善目标. 现有的常物性建材由于蓄热能力小, 远达不到理想

节能建筑围护结构要求, 而相变材料在相变过程中可吸收或放出大量的热量, 在相变温度附近的等效比热很大, 其热性能更接近理想节能建筑要求。

合理优化配置建筑围护结构热质和蓄放热能力, 可以解决建筑物能量供需双方在时间和使用强度上不匹配的问题, 起到如下作用: ①与太阳能或夜间冷风等蓄热或蓄冷方式结合, 充分利用可再生能源, 降低建筑能耗; ②提高室内热环境稳定性, 减少室内温度波动, 增加室内环境舒适性; ③对建筑的采暖空调负荷起到削峰和延迟作用, 从而有助于减少空调机组和供暖设备的装机容量。

目前需要解决的一些问题有:

(1) 采用反问题思路分析, 藉变分分析方法, 利用可再生能源和自然条件, 确定建筑的最佳围护结构形式、建材的最佳热物性及适用条件和范围。

(2) 进一步加强可和常规建材较好结合的相变材料的研究, 包括力学性能、热性能与阻燃性能等。

(3) 根据实际需求, 建立并完善相变蓄能建筑围护结构设计原则与方法。

(4) 有效准确评价相变建筑构件在房间中的应用效果和优势, 并提出推广应用的适宜性条件, 包括经济性指标。

参考文献

- 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 2008. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 4
- 2 刘加平, 何泉, 杨柳, 等. 黄土高原新型窑居建筑. 建筑与文化, 2007, 6: 39—41
- 3 Zhang Y P, Lin K P, Zhang Q L, et al. Ideal thermal physical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material. *Energy Buildings*, 2006, 38(10): 1164—1170[DOI]
- 4 张群力. 相变蓄能建筑构件蓄能调温特性及其应用基础研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2007
- 5 Khudhair A M, Farid M M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Convers Manage*, 2004, 45: 263—275[DOI]
- 6 Hawlader M, Uddin M S, Khin M M. Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. *Appl Energy*, 2003, 74(1-2): 195—202[DOI]
- 7 Hawes D W, Feldman D, Banu D. Latent heat storage in building materials. *Energy Buildings*, 1993, 20(1): 77—86[DOI]
- 8 Feldman D, Banu D, Hawes D W. Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wall-board. *Sol Energy Mat Sol C*, 1995, 36(2): 147—157[DOI]
- 9 Hawes D W, Banu D, Feldman D. Stability of phase change materials in concrete. *Sol Energy Mat Sol C*, 1992, 27(2): 103—118[DOI]
- 10 Lee T, Hawes D W, Banu D, et al. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Sol Energy Mat Sol C*, 2000, 62(3): 217—237[DOI]
- 11 Rudd A F. Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings. *ASHRAE Transactions*, 1993, 99: 339—346
- 12 Inaba H, Tu P. Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material. *Heat Mass Transfer*, 1997, 32(4): 307—312[DOI]
- 13 Xiao M, Feng B, Gong K C. Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity. *Energy Convers Manage*, 2002, 43(1): 103—108[DOI]
- 14 Zhang Y P, Ding J H, Wang X, et al. Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change materials. *Sol Energy Mat Sol C*, 2006, 90 (11): 1692—1702[DOI]
- 15 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[DOI]
- 16 Zhang Y P, Yang R, Lin K P, et al. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy Buildings*, 2006, 38(10): 1262—1269[DOI]
- 17 周国兵, 张寅平, 林坤平, 等. 定形相变材料贮能在暖通空调领域的应用研究. 暖通空调, 2007, 37(5): 27—32
- 18 Chandra S, Kumar R, Kaushik S, et al. Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCM thermal storage. *Energy Convers Manage*, 1985, 25: 15—20[DOI]
- 19 Neeper D A. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Sol Energy*, 2000, 68: 393—403[DOI]
- 20 林坤平. 相变蓄能建筑构件应用原理和效果研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2006
- 21 Peippo K, Kauranen P, Lund P D. A multi-component PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy Buildings*, 1991, 17(4): 259—270[DOI]
- 22 Stovall T K, Tomlinson J J. What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard. *ASME T J Sol Energy Engin*, 1995, 117(4): 318—325[DOI]

- 23 Ismail K A R, Castro J N. PCM thermal insulation in buildings. *Int J Energy Res*, 1997, 21: 1281—1296^[DOI]
- 24 Athienitis A K, Liu C, Hawes D, et al. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Build Environ*, 1997, 32(5): 405—410^[DOI]
- 25 Kang Y B, Jiang Y, Zhang Y P. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system-NVP System. *Energ Buildings*, 2003, 35(4): 417—425 ^[DOI]
- 26 林坤平, 张寅平, 江亿. 我国不同气候地区夏季相变墙房间热性能模拟和评价. *太阳能学报*, 2003, 24(1): 46—52
- 27 林坤平, 张寅平, 江亿. 夏季“空调”型相变墙热设计方法. *太阳能学报*, 2003, 24(2): 145—151
- 28 Zhang M, Medina M A, Jennifer B K. Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings. *Int J Energy Res*, 2005, 29: 795—809^[DOI]
- 29 Zhou G B, Zhang Y P, Lin K P, et al. Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates. *Renew Energy*, 2008, 33(6): 1228—1236 ^[DOI]
- 30 Xu X, Zhang Y P, Lin K P, et al. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. *Energ Buildings*, 2005, 37: 1084—1091 ^[DOI]
- 31 Zhou G B, Zhang Y P, Wang X, et al. An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar applications. *Sol Energy*, 2007, 81(11): 1351—1360^[DOI]
- 32 Barrio M, Font J, Lopez D O. Floor radiant system with heat storage by a solid-solid phase transition material. *Sol Energ Mat Sol C*, 1992, 27(2): 127—133^[DOI]
- 33 Athienitis A K, Chen T Y. Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage. *ASHRAE Transactions*, 1993, 99(1): 1049—1057
- 34 Bakos G. Energy management method for auxiliary energy saving in a passive solar heated residence using low cost off peak electricity. *Energ Buildings*, 2000, 31(3): 237—241^[DOI]
- 35 叶宏, 葛新石, 焦冬生. 带定形PCM的相变贮能式地板辐射采暖系统热性能的数值模拟. *太阳能学报*, 2002, 23(4): 482—487
- 36 叶宏, 程丹鹏, 葛新石, 等. 定形相变贮能式地板辐射采暖系统数值模型的实验验证及参数分析. *太阳能学报*, 2004, 25(2): 189—194
- 37 叶宏, 何汉峰, 葛新石, 等. 利用焓法和有效热容法对定形相变材料熔解过程分析的比较研究. *太阳能学报*, 2004, 25(4): 488—491
- 38 叶宏, 王军, 庄双勇, 等. 定形相变贮能式地板辐射采暖系统的实验研究. *太阳能学报*, 2004, 25(5): 651—656
- 39 罗晓熹, 张寅平, 林坤平. 电加热相变蓄热地板采暖房间热性能数值模拟及分析. *暖通空调*, 2004, 34(11): 5—9
- 40 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 电加热相变材料蓄热地板采暖的热性能模拟. *太阳能学报*, 2003, 24(5): 633—637
- 41 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 定形相变材料蓄热地板电采暖热性能研究. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(12): 1618—1621
- 42 林坤平, 张寅平, 徐煦, 等. 定形相变材料蓄热地板电采暖热性能实验研究. *高技术通讯*, 2005, 15(4): 51—54
- 43 Lin K P, Zhang Y P, Xu X, et al. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Energ Buildings*, 2005, 3: 215—220^[DOI]
- 44 Zhou G B, Zhang Y P, Zhang Q L, et al. Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase change material plates. *Appl Energy*, 2007, 84(10): 1068—1077^[DOI]
- 45 张群力, 狄洪发, 林坤平, 等. 相变蓄能式低温热水地板采暖系统传热性能模拟研究. *工程热物理学报*, 2006, 27(4): 641—643
- 46 张群力, 狄洪发, 张寅平, 等. 双层相变材料蓄能型辐射采暖与空调吊顶热性能. *化工学报*, 2006, 57(增刊): 74—79
- 47 Lin K P, Zhang Y P, Xu X, et al. Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Build Environ*, 2004, 39: 1427—1434 ^[DOI]
- 48 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 地板下送风式相变蓄热电采暖系统. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 821—824
- 49 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 地板下送风相变蓄热电采暖系统热性能模拟. *太阳能学报*, 2006, 27(8): 737—742
- 50 Lin K P, Zhang Y P, Di H F, et al. Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape stabilized PCM for thermal storage. *Energ Convers Manage*, 2007, 48(7): 2016—2024^[DOI]
- 51 康艳兵. 夜间通风相变贮能吊顶系统研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2001
- 52 钟志鹏. 结合夜间通风的相变墙房间热性能研究. 硕士学位论文. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2001
- 53 Koschenz M, Lehmann B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energ Buildings*. 2004, 36: 567—578^[DOI]