



# 定形相变储能材料在暖通空调领域的应用研究<sup>\*</sup>

清华大学 周国兵<sup>☆</sup> 张寅平<sup>△</sup> 林坤平 张群力 狄洪发

**摘要** 介绍了定形相变储能材料制备方法,热物性、稳定性,定形相变储能与太阳能、夜间通风、电加热地板供暖、蓄热槽贮换热等系统结合应用于建筑供暖空调方面的一些研究成果和动态,对进一步值得研究的问题提出了建议。

**关键词** 定形相变材料 储能 应用研究 建筑节能

## Application of shape-stabilized phase change materials for energy storage in HVAC field

By Zhou Guobing<sup>★</sup>, Zhang Yinping, Lin Kunping, Zhang Qunli and Di Hongfa

**Abstract** Reviews the investigations on preparation, thermo-physical properties, stability and the application of the material combined with solar energy, night ventilation, under-floor electric heating system and heat storage tank in building heating and air conditioning, and proposes some suggestions for future work.

**Keywords** shape-stabilized phase change material, energy storage, application study, energy saving in building

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

### 0 引言

利用相变材料(phase change material, PCM)的相变潜热蓄冷或贮热具有温度变化小、蓄能密度大的优点,因此它在建筑供暖、空调等领域有着广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。一方面它可以缓解能量供求双方在时间、强度和地点上不匹配的矛盾,起到移峰填谷的作用,降低空调或供暖系统的运行维护费用;另一方面它可以减小建筑物内的温度波动,提高室内舒适度。传统的固-液相变材料在使用过程中都需要特定容器,以防止泄漏;另外,相变材料不与传热介质直接接触,不仅增加了热阻,降低了换热效率,而且使成本大大提高,阻碍了相变贮热系统的推广使用。近年来,一类新型相变材料——定形相变储能材料(shape-stabilized PCM)引起了人们的极大兴趣。这类相变材料在相变过程中形状

可以保持不变,在使用时无需封装,不泄漏,大大降低了相变贮热系统的成本,而且某些性能优异的定形相变材料还可以与传热介质直接接触,使换热效率得到很大提高<sup>[2]</sup>。定形相变材料的这些优点使其近几年在国内外被广泛而深入地研究。本文从定形相变材料的制备、热物性以及太阳能、夜间通风、电加热地板供暖、蓄热槽贮换热系统等结合应用于建筑供暖空调等几个方面对其研究进展进行综述,并提出进一步工作的建议。

### 1 定形相变材料及其制备

定形相变材料是一种新型复合材料,由相变材料(芯材)和高分子支撑与封装材料(囊材)组成。

①<sup>☆</sup> 周国兵,男,1970年11月生,工学博士,博士后

<sup>△</sup> 100084 清华大学建筑技术科学系

(010) 62772518

E-mail: zhangyp@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2006-05-18

一次修回:2006-09-12

二次修回:2007-03-22

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究(973)专项经费资助项目(编号:2001CB409600)

适用于暖通空调领域的相变材料一般为石蜡和硬脂酸酯;支撑材料一般为高分子材料如高密度聚乙烯(HDPE)及热塑弹性体(SBS),其熔点较高,在复合材料中形成空间网状结构,对作为芯材的相变材料起着微封装和支撑作用。因此,只要工作温度低于高分子囊材的熔点,作为芯材的相变材料发生固-液相变时就不会流出,整个复合材料能保持原来的形状不变并具有一定的强度,降低了泄漏的可能性。定形相变材料可制成板状等形式用于供暖空调系统或与建筑围护结构结合,实现有效贮能。

文献[3]总结了制备定形相变材料的三种方法:

1) 熔融共混法。这种方法比较适合于制备工业和建筑用低温定形相变材料。利用相变材料和载体基质的相容性,使它们熔融后混合在一起而制成成分均匀的贮能材料。以石蜡和聚乙烯为例,将二者以一定的质量比在较高温度下溶解搅拌,使两种材料均匀混合,然后降温冷却,由于两者的熔点相差较大,聚乙烯首先凝固并形成空间网状结构,石蜡则被束缚其中,由此形成定形相变石蜡。此种材料可以制成粒状、棒状,也可制成板材。根据需要,可以选择不同熔点的石蜡制备一系列具有不同相变温度的定形相变材料。

2) 封装法。主要应用于制备纺织材料(如可抵抗外界极度冷、热变化的条纹晴纶)。把载体基质按照一定的工艺制成微胶囊、多孔泡沫塑料或三维网状结构,再把相变材料灌注于其中或把载体基质浸入熔融的相变材料中,这样微观上仍是发生固-液相变,但宏观上材料仍保持原有形状。

3) 混合-成型-烧结法。此法主要用于制备高温定形相变材料。首先将载体基质和相变材料球磨成直径小于几十微米的粉末,然后加入添加剂压制成形,最后在电阻炉中烧结,从而得到贮能材料。

方贵银和李辉采用物理吸附的方法将相变材料复合到固态支撑材料中,以制得定形复合相变材料<sup>[4]</sup>,测试结果表明,该贮能材料具有较大的相变潜热和较好的热稳定性。

## 2 定形相变材料的热物性及稳定性

### 2.1 热物性测试

热物性研究是定形相变材料成功应用的基础。日本学者 Inaba 等人较早研究了高密度聚乙烯和

熔点为 54 °C 的石蜡(质量分数为 0.74)混合而成的定形相变材料的热物理性质<sup>[5]</sup>。利用瞬态热线法、差示扫描量热仪(DSC)和水量热计分别测量了定形相变石蜡的有效导热系数、潜热和比热容,并将其表示为各组分相应物性和份额的关系式。结果表明热物性存在不连续性,并且热物性与温度的关系依相变材料处于固态、液态及相变过渡态而各不相同。

Ye 等人用高密度聚乙烯和熔点在 58 °C 左右的精炼和半精炼石蜡(质量分数为 0.75)作为原料制得的定形相变石蜡潜热高达 150.74 kJ/kg<sup>[6]</sup>。他们采用傅里叶变换红外光谱、凝胶色谱、电子扫描显微镜(SEM)等工具对一种定形相变石蜡的组成和结构进行了分析<sup>[7]</sup>,结果表明石蜡和聚乙烯混合充分,形成了均匀的相结构。

Zhang、秦鹏华等人分别用低密度聚乙烯、高密度聚乙烯以及热塑弹性体(SBS)作为支撑材料制备了定形相变材料,利用电子扫描显微镜、差示扫描量热仪 2910 等仪器研究了其理化结构及热物性<sup>[8-9]</sup>。测试结果表明,以高密度聚乙烯为支撑材料的定形相变材料在 80 °C 恒温下加热 24 h 后仍能保持一定强度,而以低密度聚乙烯为支撑物的材料强度相对较差,因此高密度聚乙烯更适合作支撑封装材料;试样各个不同部位潜热值差别在 10% 以内;石蜡掺混比例不宜超过 90%;定形相变材料加入混凝土后,其单位体积的蓄热量比混凝土有明显提高。

前面所述定形相变材料的热物性测试大多采用了差示扫描量热仪方法。张寅平等开发了一种测定 PCM 样品潜热、比热容及导热系数的简单方法——T-History 方法<sup>[10]</sup>,即绘制 PCM 样品的温度-时间变化曲线,并将其与物性已知的材料(作为参照物,如水)的温度-时间曲线相比较,从而得到其热物理性质。这种方法的优点是实验系统简单,一组测试可测定多个样品及每个样品的多种物性,测量精度可满足工程应用要求,并且还可清晰地观察到 PCM 的相变过程。

### 2.2 热传导性能的改善

由于定形相变材料的组成成分均为有机物,导热系数较小,故其吸放热速率较慢,这阻碍了该类材料的有效应用。改善定形相变材料的热传导性能成为研究的一个热点问题。Py 等人研究了石蜡

(质量分数 65%~95%)与膨胀石墨混合而成的定形相变材料,发现此复合相变材料的热导率与单独的石墨基体的热导率相同<sup>[11]</sup>。Ahmet 用两种不同熔点的石蜡与高密度聚乙烯制成了定形相变材料,在此材料中加入质量分数为 3%的膨胀石墨和鳞状石墨后,两种定形相变材料的导热系数分别提高了 14%和 24%,复合材料中石蜡不渗漏的最大质量分数为 77%<sup>[12]</sup>。

肖敏等人发现在石蜡和热塑弹性体组成的复合相变材料中加入膨胀石墨后,其热传导性能显著提高,放热时间比纯石蜡缩短了 61%<sup>[13-15]</sup>。丁建红等人对定形相变材料中添加三星硅藻土、硅石粉、碳酸钙、石墨等不同种类和含量添加剂后的导热系数进行了定量分析<sup>[16]</sup>,结果表明,添加石墨的试样导热系数最大,当石墨含量为 20%时,定形相变材料导热系数增大 221%。通过对实验数据的拟合,得到了添加的石墨的质量分数与材料有效导热系数的拟合关系式。

### 2.3 稳定性

前文已经提到当相变芯材的质量分数超过临界值时定形相变材料会发生渗漏。田胜利等人以纳米多孔石墨为载体基质,与硬脂酸丁酯混合制成了一种定形相变材料<sup>[17]</sup>。利用差示扫描量热仪研究了硬脂酸丁酯质量分数不同的定形相变材料的热稳定性,指出当硬脂酸丁酯质量分数达 90%时定形相变材料有细微的渗出,建议使用时硬脂酸丁酯的质量分数在 85%以下。闫全英等人对低熔点石蜡和高密度聚乙烯混合而成的定形相变材料的研究也得到了类似的结论<sup>[18]</sup>。

万红等人针对复合过程中存在的分散效果差、浸润性不好的问题采用表面活性剂对定形相变材料进行了表面改性,使其由憎水变为亲水,从而改善了分散效果,加强了复合材料的界面结合性能<sup>[19]</sup>。这一低成本表面改性技术为定形相变材料与水泥或石膏的复合打下了基础。

### 3 定形相变材料贮能在暖通空调领域的应用

定形相变材料在暖通空调领域的应用主要分为两大类:一类是定形相变材料与建筑围护结构结合,如将定形相变材料板置于墙和天花板的内表面或地板结构中,充分利用太阳能、夜间通风冷却等自然能源,降低室内温度波动,提高热舒适度,使建筑供暖或空调系统不用或者少用能量;另一类是定

形相变材料与供暖空调系统结合,利用夜间廉价电使空调或供暖系统运行并贮能,再将所蓄冷/热量用于日间用电高峰期,以起到削峰填谷的作用,降低空调或供暖系统的运行费用。

#### 3.1 定形相变建筑构件蓄能在被动式供暖空调系统中的应用

##### 3.1.1 定形相变建筑构件蓄能在被动式太阳房中的应用

太阳能具有时变性和间歇性,其最大值出现在中午。相变材料与建筑围护结构结合形成的相变建筑构件,如相变墙、相变屋顶及相变地板等,可以在冬季白天贮存太阳能,夜间室温降低后释放给室内空气,这种相变建筑构件特别适用于钢结构和玻璃墙轻质建筑,可使其达到重质建筑的效果。张寅平等利用定形相变材料板作为蓄热地板,进行了太阳能供暖试验<sup>[20]</sup>。试验结果表明,此相变材料可以蓄存大量的太阳能,有相变地板房间的室温比没有相变材料房间高 2℃,并且室温波动范围也明显减小。

Xu 等人对采用定形相变材料地板的玻璃墙结构房间的热性能进行了影响因素和效果分析,发现:1) 对于给定的气候条件和建筑结构,合适的相变温度接近冬日平均室温;2) 潜热和导热系数应分别大于 120 kJ/kg 和 0.5 W/(m·K);3) 定形相变材料板厚度应不大于 20 mm;4) 定形相变材料板与地板覆盖层之间的空隙应尽可能小,以减小传热热阻<sup>[21]</sup>。

最近的研究结果表明,在提高冬季室温效果方面定形相变材料板置于内墙内表面比置于外墙内表面要好;并且由于相变材料板表面与室内空气的换热处于自然对流状态,表面传热系数小,应尽可能扩大定形相变材料板面积,并且板要薄(因其导热系数较小),以提高其蓄能能力。

在高架活动地板空腔内灌注水泥砂浆和粒状定形相变材料的混合物,可以增强地板的蓄热功能,其蓄热能力比同质量普通建筑材料的显热蓄热能力增大 3~7 倍。清华大学超低能耗示范建筑是 2008 年北京绿色奥运建筑的“预研示范建筑”,该建筑中采用了近 1 000 m<sup>2</sup> 定形相变材料高架活动地板(见图 1),对定形相变材料在建筑中的应用有较好的示范和推广作用。

##### 3.1.2 定形相变建筑构件蓄能结合夜间通风在夏



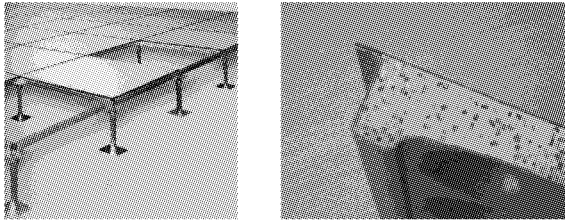


图 1 清华大学超低能耗示范建筑所用的相变高架活动地板

### 季降温中的应用

建筑围护结构蓄能结合夜间通风降温是一种提高夏季室内热舒适度的有效途径,可通过开窗、使用屋顶风扇等方式实现。利用相变材料建筑构件贮存夜间通风冷量,然后在白天释冷,可以有效降低室温和壁面温度。康艳兵等人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)<sup>[22]</sup>,该系统具有贮/换热面积大、蓄/放热效率高、夏季降温效果好等优点。冯国会等人分析了在夏季昼夜温差较大的地区利用相变墙蓄冷的可行性,指出我国地处北纬 39° 以上的许多城市(夏季平均温差都在 10 °C 以上,平均气温在 24 °C 左右)比较适合于利用相变墙转移冷负荷,调节室内温度<sup>[23]</sup>。闫全英等人研究了两种低温定形相变石蜡(十七烷和十八烷)用于相变墙体蓄冷的可能性,讨论了不同石蜡含量下材料的相变温度、潜热、均匀性和稳定性,为实际应用提供了依据<sup>[24]</sup>。

### 3.2 定形相变材料蓄能与供暖空调系统结合

定形相变材料蓄能与供暖空调系统结合,在用电低谷时储能用于用电高峰时段,可以缓解目前的电力紧张形势,尤其是在实行峰谷分时电价的地区,更能显其优势。目前有相变蓄热电加热地板供暖系统及与常规供暖空调系统结合的定形相变蓄热槽等形式。

#### 3.2.1 定形相变材料蓄热电加热地板供暖系统

叶宏等人提出了一种以定形相变材料作为贮热介质的新型地板辐射供暖系统,建立了相应的理论模型,数值模拟结果表明熔点在 32 °C 左右的定形相变材料是该系统较理想的贮热材料<sup>[25-26]</sup>。利用晚上 10:00 至次日早晨 6:00 间的谷价电在地板表面温度低于 29 °C 时蓄能,能源利用效率高;全室内空气温度可维持在 21~25 °C,具有很好的热舒适性;用于加热的电加热器工作状态变化很少,控制相当简单。作者对模型进行了实验验证并利

用改进的模型研究了定形相变材料的熔点、相变潜热、相变半径及电加热功率等关键参数对相变储能式地板辐射供暖系统热性能的影响。发现相变温度越接近供暖温度,相变材料蓄热能力利用率越高;较小的相变半径(即相变材料的纯度较高)可减少室内温度的波动;对于北京地区,选择 150 W/m<sup>2</sup> 左右的电缆加热功率供暖效果较好。

林坤平等提出了一种利用定形相变材料蓄存夜间廉价电热的地板电供暖系统,搭建了应用此供暖系统的实验房间,测试结果表明,定形相变材料板上表面温度可全天内维持在相变温度附近,约一半以上的高峰电热负荷转移到了夜间低谷电价时段,在实行峰谷电价的地区,可以节省电费,且室内温度分布均匀,是一种节能舒适的供暖方式<sup>[27-28]</sup>。他们还利用建立的理论模型,分析了系统各因素对其热性能的影响和整个冬季的电加热控制方法<sup>[29]</sup>。结果显示,材料的相变温度和空气层厚度对系统使用效果的影响较大,而相变材料、木地板厚度与导热系数对系统的影响很小。在整个冬季的电加热控制方面,应用了控制地板加热面积的方法,即将电加热器按地板面积均分为五部分,各部分可单独工作,当平均室温高于 20 °C 或低于 18 °C 时相应地在夜间关闭或启动电加热,此方法可使整个供暖季的室温基本保持在人的热舒适范围内。

#### 3.2.2 定形相变蓄热槽贮换热系统

定形相变材料由于不需另外封装,可与供暖空调系统的热/冷媒直接接触换热,有利于提高蓄热槽的蓄/放热效率。

Inaba 等人用数值方法较早研究了装有定形相变材料的矩形槽的蓄/放热特性<sup>[30-31]</sup>,发现蓄/放热特性很大程度上受换热介质流动(自然对流、强制对流并存)方向的影响,并且蓄/放热时间随换热介质的入口流速增大而缩短;随介质入口温度上升蓄热时间缩短,而放热时间呈现先升后降的趋势。

Osamu 等人利用粒状定形相变材料(相变温度 95 °C)堆积床蓄热产生闪发蒸气,对该系统的放热特性进行了实验研究和数值模拟,结果表明系统的贮换热效率较高,超过 97% 的蓄热得到了利用<sup>[32]</sup>。Yasushi 等人研究了分别填充两种不同尺度粒状定形相变材料(相变温度 84 °C)的堆积床式

蓄热槽的热特性,发现尺度较大的定形相变材料与流体的换热系数要大些,但由于其单位体积的表面面积较小,故与换热流体间的温差反而较大;延长定形相变材料与换热流体的接触时间可弥补相变材料本身及与流体间的传热热阻较大的缺陷<sup>[33]</sup>。

李香玲等人对填充了板状定形相变材料(石蜡为相变主体、相变温度 42 ℃)、以水作为热媒的蓄热槽的蓄/放热特性进行了实验研究,重点考察了热媒的流速、流动方向及进口温度的变化对蓄热槽蓄/放热特性的影响,认为对于蓄热过程,热媒在蓄热槽内的流动方向宜上进下出,放热过程则相反;热媒进口温度和流速对蓄热槽的蓄/放热时间都有影响,前者的影响更为显著<sup>[34]</sup>。陈超等人通过数值计算对影响蓄热槽蓄/放热特性的主要因素——相变材料的几何尺寸、导热系数、流体流速、表面传热系数、相变材料填充率等的影响规律进行了分析,结果表明,蓄热槽的蓄/放热时间随定形相变材料板高度的增加而近似线性增加;随板厚增加呈抛物线上升;随相变材料导热系数、流体流速、表面传热系数的增加而缩短,但均存在某一临界值,之后变化不再明显;随空隙率减小而缩短。与实验结果有较好的一致性<sup>[35]</sup>。

由于定形相变材料一般采用有机类相变材料作为芯材,其相变多发生在一个较宽的温度范围内,而不是发生在一个确定的熔点。针对这一特点,叶宏等人分别采用有效热容法和焓法对以石蜡为芯材的定形相变材料的熔解过程进行了分析,发现只要在焓法中把相变半径按照差示扫描量热仪实测的结果取值,两种算法的结果一致<sup>[36]</sup>。定形相变储能材料在暖通空调领域有着重要的应用价值,建立能准确模拟其相变过程的数理模型十分必要。由于相变过程的非线性特征,分析解的应用范围有限,普遍采用数值解法。

#### 4 结论和建议

定形相变材料具有利用相变潜热储能、无需封装等优点,在建筑供暖空调领域有着广阔的应用前景。利用建筑围护结构内表面面积大的特点,将定形相变材料制成薄板作内衬,结合太阳能、夜间通风等自然能源,可有效用于被动式供暖空调;与常规供暖空调系统结合,在用电低负荷期间蓄能并用于用电高峰负荷时段,可以解决能源供求在时间和强度上不匹配的矛盾,尤其是在实行分时电价制的

地区,可降低供暖空调运行费用,具有明显的经济效益。在应用定形相变材料蓄能方面,有以下工作要做。

1) 改善定形相变材料及其构件的传热、阻燃性能。

2) 在一些气候比较温和的地区,利用相变储能结合太阳能、夜间通风即可满足冬夏季室内热舒适要求;然而在夏热冬冷地区,仅仅依靠被动式供暖、降温尚难完全满足建筑冬夏季的热舒适度要求,定形相变材料与暖通空调系统的有机结合方式有待进一步研究,如相变建筑围护结构与空调系统末端一体化等。

3) 对定形相变材料在实际系统中的应用效果、经济性如投资回收期等进行评价。

#### 参考文献

- [1] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等. 相变储能——理论和应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996
- [2] 叶宏. 新型相变贮热材料[J]. 太阳能,2000(3):10-11
- [3] 李爱菊,张仁元,黄金. 定形相变储能材料的研究进展及其应用[J]. 新技术新工艺,2004(2):45-48
- [4] 方贵银,李辉. 定形复合相变储能材料实验研究[J]. 真空与低温,2003,9(3):171-174
- [5] Inaba H, Tu P. Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material [J]. Heat and Mass Transfer, 1997, 32(4):307-312
- [6] Ye H, Ge X S. Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, 64(1):37-44
- [7] 叶宏,葛新石. 一种定形相变材料的结构和理化分析[J]. 太阳能学报,2000,21(4):417-421
- [8] Zhang Y P, Yang R, Di H F, et al. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings [C] // Collection of Technical Papers—2nd International Energy Conversion Engineering Conference AIAA 2004, 2004:600-610
- [9] 秦鹏华,杨睿,张寅平,等. 定形相变材料的热性能[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(6):833-835
- [10] Zhang Y P, Jiang Y, Jiang Y. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials [J]. Measurement Science and Technology,

- 1999, 10(3):201-205
- [11] Py X, Olives P, Mauran S. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(14):2727-2737
- [12] Ahmet S. Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(13/14):2033-2042
- [13] 肖敏, 龚克成. 良导热、形状保持相变蓄热材料的制备及性能 [J]. *太阳能学报*, 2001, 22(4):427-430
- [14] Xiao M, Feng B, Gong K C. Preparation and performance of shape-stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity [J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(1):103-108
- [15] Xiao M, Feng B, Gong K C. Thermal performance of a high conductive shape-stabilized thermal storage material [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 69(3):293-296
- [16] 丁建红, 张寅平, 王馨, 等. 掺杂对定形相变材料导热系数的影响 [J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6):853-856
- [17] 田胜利, 张东. 硬脂酸丁酯/多孔石墨定形相变材料的实验研究 [C]// 建筑新技术研讨会论文集, 2005:62-66
- [18] 闫全英, 王威. 相变墙体中的定形相变材料的实验研究 [J]. *节能技术*, 2004, 11(6):3-4
- [19] 万红, 孙诗兵, 田英良, 等. 定形相变材料的表面亲水改性研究 [J]. *化学建材*, 2005, 21(4):49-50, 53
- [20] Zhang Y P, Xu X, Di H F, et al. Experimental study on the thermal performance of the shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings [J]. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of ASME*, 2006, 128(2):255-257
- [21] 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 [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(10):1084-1091
- [22] Kang Y B, Jiang Y, Zhang Y P. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(4):417-425
- [23] 冯国会, 曹广宇, 于瑾, 等. 夏季昼夜温差较大地区相变墙蓄冷可行性分析 [J]. *沈阳建筑大学学报*, 2004, 21(4):350-353
- [24] 闫全英, 王威. 低温定形相变材料在相变墙体中的应用的可行性研究 [J]. *新型建筑材料*, 2005(2):58-59
- [25] 叶宏, 葛新石, 焦冬生. 带定形 PCM 的相变储能式地板辐射采暖系统热性能的数值模拟 [J]. *太阳能学报*, 2002, 23(4):482-487
- [26] 叶宏, 程丹鹏, 葛新石, 等. 定形相变储能式地板辐射采暖系统数值模型的实验验证及参数分析 [J]. *太阳能学报*, 2004, 25(2):189-194
- [27] 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 定形相变材料蓄热地板采暖系统热性能 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(12):1618-1621
- [28] Lin K P, Zhang Y P, Xu X, et al. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(3):215-220
- [29] Lin K P, Zhang Y P, Xu X, et al. Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates [J]. *Building and Environment*, 2004, 39(12):1427-1434
- [30] Inaba H, Tu P. Transient heat characteristics of a rectangular storage vessel packed with shape-stabilized phase change material (heat storage process) [G]// *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(Part B)*, 1996, 62(596):1576-1583
- [31] Inaba H, Tu P. Transient heat characteristics of a rectangular heat storage vessel packed with shape-stabilized phase change material (effect of various factors on heat release process) [G]// *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(Part B)*, 1996, 62(599):2790-2797
- [32] Osamu M, Muhammad E K, Hidehiko N, et al. Transient characteristics and performance of hybrid latent heat storage and spray flash evaporation system [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1997, 30(6):1076-1082
- [33] Yasushi K, Kotaro T, Yasuhiro M, et al. Effect of pellet size on discharge characteristics of latent heat storage columns packed with cross-linked polymer pellets [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2001, 34(6):819-827
- [34] 李香玲, 陈超, 蹇瑞欢, 等. 填充板状定形相变材料蓄热槽蓄/放热特性实验研究 [J]. *暖通空调*, 2005, 35(10):122-126, 97
- [35] 陈超, 蹇瑞欢, 焦庆影, 等. 新型定形板状相变材料的蓄/放热特性 [J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6):857-862
- [36] 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溶解过程分析的比较研究 [J]. *太阳能学报*, 2004, 25(4):488-491