

基于毛细管网的相变蓄热模块实验研究

李刚¹,于玺¹,柳长翔¹,庞凯²,王龄喆¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 南京苏夏工程设计有限公司北方分公司,辽宁 沈阳 110117)

摘要 为提高冬季农村居民的室内舒适度,改善农居室内局部热环境,降低能耗,减少污染,提出一种新的将相变材料和毛细管网型末端相结合的相变蓄热模块供暖系统。**方法** 根据供水温度和相变材料的填充量的不同组合设计了不同工况,并搭建了对比测试实验平台,对模块蓄放热时间及模块表面温度进行测试和分析。**结果** 相变蓄热模块系统在填充4 kg相变材料、供水温度为50℃时蓄热时间最短,为80 min;在填充5 kg相变材料、供水温度为40℃时的蓄热时间最长,为160 min;在填充5 kg相变材料,供水温度为50℃时的蓄热时间为100 min;在填充4 kg相变材料,供水温度为40℃时的蓄热时间为120 min;填充4 kg和5 kg相变材料的模块系统表面温度保持在25℃以上的持续放热时间分别为8 h和10 h。**结论** 相变蓄热模块供暖系统可联合火炕以及太阳能热水系统、户用小型锅炉等多种低温热源;基于毛细管网的相变蓄热模块能较好的满足用户对模块放热时间的要求,可以有效改善室内局部热环境。

关键词 蓄热模块;相变材料;毛细管网;局部热环境

中图分类号 TU832

文献标志码 A

Experimental Study on Phase Change Thermal Storage Module Based on Capillary Network

LI Gang¹, YU Xi¹, LIU Changxiang¹, PANG Kai², WANG Lingzhe¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Northern Branch of Nanjing Suxia Design & Engineering Co., Ltd, Shenyang, China, 110117)

Abstract: In order to improve rural local indoor thermal environment, raise the rural residents' indoor comfort in winter, reduce the energy consumption and pollution, a new type of heat storage module combined with phase change materials and capillary network is presented. The heat for the module can come from Kang, the solar energy hot water system, a small boiler as well as other low temperature heat source. Different combination of experimental platforms are designed according to different water temperature and the quantity of phase change materials. Relevant parameters

收稿日期:2017-06-23

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2012BAJ26B02);住房和城乡建设部科技攻关项目(2015-K1-043);沈阳建筑大学基金项目(2013143)

作者简介:李刚(1975—),男,副教授,主要从事建筑节能技术方面研究。

such as the duration of heat storage and release and the surface temperature of the module were tested and analysed. The results show that the shortest heat storage time occurred under the condition that the module was packed with 4 kg of phase change materials and the water supply temperature is 50 °C, which is 80 min. While under the condition that the module was packed with 5 kg of phase change materials and the water supply temperature is 40 °C, the heat storage time goes up to 160 min, which is the longest of the tested conditions. The heat storage time of the condition with 5 kg of phase change materials and 50 °C heating water and with 4 kg phase change materials and 40 °C heating water are 100 min and 120 min respectively. As for the period of heat release, the module surface temperature stays above 25 °C packed with phase change materials of 4 kg and 5 kg was 8 h and 10 h respectively. In conclusion, the phase change thermal storage module can meet the users' continuous heating demands and can improve the local indoor thermal environment effectively.

Key words: heat storage module; phase change materials; capillary network; the local thermal environment

我国发改委在 2001 年以 9 号令发布了《产业结构调整指导目录》，相变蓄能模块属于实用新型发明，符合指导目录中的第一类：鼓励类，鼓励新技术新工艺，属国家重点鼓励和发展的产业和技术。将相变蓄能材料应用至建筑材料中，可有效地提高建筑物的能源利用率，为能源节约提供了一条行之有效的途径。把相变储能材料以不同形式融入到建筑材料中已成为当今国内外的研究热点^[1]。相变蓄能技术的基本原理：由于物质在物态转变（相变）过程中，等温释放的相变潜热通过盛装相变材料的原件，将能量储存起来，待需要时再把能量通过一定的方式释放出来供用户使用；延长了能量的传输时间，降低了温度梯度，这样就可以根据需要储存能量，同时还可减小室内的温度波动，提高室内的舒适度^[2]；其具有效率高、恒温吸放热以及蓄能密度大等特性，可用于蓄能和温度控制。近年来，相变蓄能技术被广泛应用于建筑材料中。毛细管网型末端应用了展开面积大的毛细管和分集水式结构，其换热面积大，阻力小且均匀，因此换热效率较其他末端高，采暖时要求的供水水温为 28 ~ 32 °C^[3-7]，低品位能可以得到有效的利用。Koschenz 和 Lehmann 将石蜡和毛细管水系统布置在办公室和工业建筑的天花板层，实验结果发现石蜡的蓄热能力

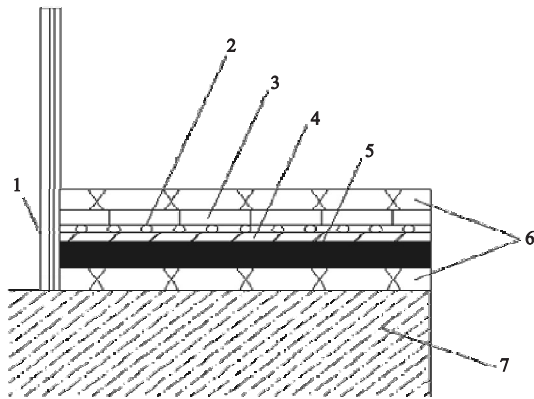
高达 0.3kW·h/(m²·d)，并且用于顶棚辐射供热供冷系统时，可将天花板的整体厚度控制在 5cm 以内，通过模拟确定了这种天花板面板的热特性参数和应用要求^[8-9]。冯国会等^[10-14]建立了相变蓄能 - 太阳能 - 毛细管网的实验平台，通过实验和模拟的方式，进行了毛细管网作为地板散热末端的研究以及相关的基础工作，得到了一些新型供暖模式的实践和理论经验。吴生等^[15-16]将毛细管网、PE 地暖管分别和沙子和相变材料相结合应用于低温地板辐射采暖系统，通过实验研究 4 种不同组合形式下的供暖效果和蓄放热特性。

关于相变材料蓄热的优越性和毛细管网型末端散热性能的优越性，相关文献中已有大量论述^[17-22]。在研究方面，国内外也都已做了大量的工作：何静^[23]对相变材料蓄能式毛细管网地板辐射采暖进行了热特性的研究；冯国会等^[24]将相变蓄热应用于地板热水采暖。基于此，笔者详尽地阐述了相变蓄热模块的结构、原理和评价指标、相变传热基础理论和相变材料技术应用等方面的内容，深入分析了 Fluent 数值模拟过程以及实验方案的设计和测试。通过对填充不同质量的相变材料和不同供水温度的组合设计了四种不同的工况，分别对 4 种工况下的蓄放热过程进行

数据收集以及后期的处理与分析.研究表明:将相变材料的蓄热性能与毛细管网传热速度快的特性相结合制备相变蓄热模块,可联合火炕以及太阳能热水系统、户用小型锅炉等多种低温热源,能有效提高室内舒适度,改善室内局部热环境,降低能耗,减少污染.

1 相变蓄热模块结构设计

相变蓄能模块主要由3部分组成:用以承担封装相变材料作用的壳体;在壳体内部的相变材料;热源工质流经的毛细管网末端.还包括用以保温的保温层、反射铝箔层以及用以固定毛细管网的木板.相变蓄热模块结构示意图如图1所示.



1.墙体;2.毛细管(管径3.85 mm);3.相变层;4.反射铝箔;
5.木板(用以固定毛细管网);6.保温层;7.火坑。

图1 相变模块结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of phase change thermal storage module

白天,通过太阳能热水器、家用小型锅炉等类型的低温热源加热,热水流经相变蓄热模块中的毛细管网以及加热模块;模块内的相变材料还可以与火炕进行导热,达到相变材料的相变温度后,相变材料开始熔化同时蓄存潜热,此时相变模块的表面温度将基本维持不变,待相变材料完全熔化后,模块表面温度继续上升.夜间,停止热源供热后,相变蓄热模块表面温度将开始下降,当达到相变温度附近时,由于相变材料开始凝固,能够放出热量,因此,模块表面温度将维持在相变温

度上一段时间直到模块内的相变材料完全凝固.相变蓄热模块与室内环境的换热方式主要由模块与模块上方的室内空气的对流换热以及模块与建筑围护结构的辐射换热两部分组成.这两种换热方式共同作用以提高室内温度,使得室内温度分布均匀,垂直方向上温度梯度小,热舒适性好,其采暖效果的好坏以及热工性能直接取决于模块的蓄热性和散热性.

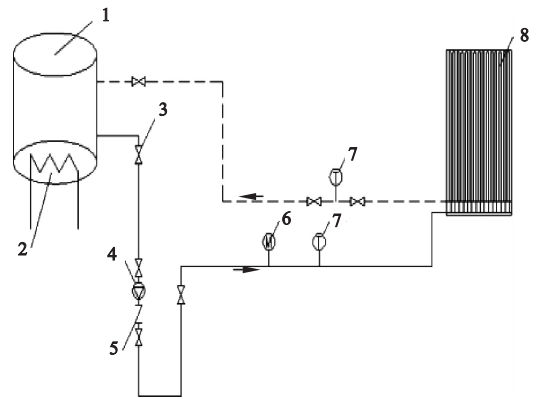
2 实验测试

2.1 设计条件

实验地点位于上海市奉贤区海奕路169号(北纬 $30^{\circ}56'$,东经 $121^{\circ}43'$),属于夏热冬冷地区.上海市冬季室外空调计算干球温度为 -1.2°C ,冬季最多风向室外平均风速为 3.00 m/s .本实验选择2015年1月作为测试时间.

2.2 实验系统介绍

实验系统示意图如图2所示,主要包括相变蓄热模块、热水循环系统以及测量系统.



1.蓄热水箱;2.电加热器;3.闸阀;4.水泵;5.止回阀;
6.超声波流量计;7.测温仪表;8.相变蓄热模块。

图2 相变蓄热模块供暖系统示意图

Fig. 2 Heating system schematic diagram of phase change thermal storage module

2.3 实验台的搭建

实验台的搭建过程由以下几个步骤组成:1)安装电加热水箱、循环水泵以及供回水管路;2)制备相变蓄热模块;相变蓄热模

块由毛细管网型末端、相变材料填充层、保温层等构成;3)将测温三通及相应的热点偶、超声波流量计等仪表安装在供回水管上;4)在模块表面均匀的布置热电偶,测量模块表面温度.实验系统需在实验的准备阶段搭建完成.

实验台搭建完成之后,需先对相应的设备进行检查:校核实验中所用到的热电偶,是否能正常使用(在实验过程中,要与测点充分接触以减小测量误差);巡检仪是否能准确地采集相应的数据;超声波流量计是否正常工作;循环水泵是否正常运行.进行实验时,要先开启电加热水箱,确保供水温度保持一定,再开启循环水泵,保持供回水管路上的阀门保持全开的状态,使相变蓄热模块供暖系统开始运行.在相变蓄热模块的蓄热过程中,利用热电偶测得模块表面温度、室内温度以及供回水温度,并经巡检仪输送到电脑进行记录和保存.当模块内的相变材料完全融化后,关闭热水循环,通过模块表面的热电偶,经巡检仪将放热过程中模块表面温度的变化记录并保存在电脑中,再由此分析相变蓄能模块的蓄放热特性.

2.4 运行工况设计

为了研究不同供水温度下和填充不同质量的相变材料(Phase Change Materials, PCM)的条件下,相变蓄热模块的蓄放热特性,并由此得出最佳的供水温度和相变材料填充量的组合.为确保供水温度不宜过高也不宜过低,笔者在实验中分别选取供水温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.由相关的热力学计算出不同质量的相变材料的蓄热量以及前文模拟结果分析,分别选取 4 kg 和 5 kg 的相变材料制备成相变蓄热模块.具体工况设置如下:

工况1:采用 4 kg 相变材料制备成相变蓄热模块,供水温度选取为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;

工况2:采用 4 kg 相变材料制备成相变蓄热模块,供水温度选取为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

工况3:采用 5 kg 相变材料制备成相变

蓄热模块,供水温度选取为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;

工况4:采用 5 kg 相变材料制备成相变蓄热模块,供水温度选取为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5 实验测试方法

测试项目:采用XMZ^{*}-J系列万能输入巡回检测仪表测试相变蓄热模块表面温度变化以及供回水温度,记录不同工况下相变蓄热模块所需的蓄热时间以及在停止热水循环后模块放热过程中保持在规定温度范围内的放热时间.

测点布置:通过在相变蓄热模块表面上平均布置6个测点来观测模块表面温度.测点布置图见图3.

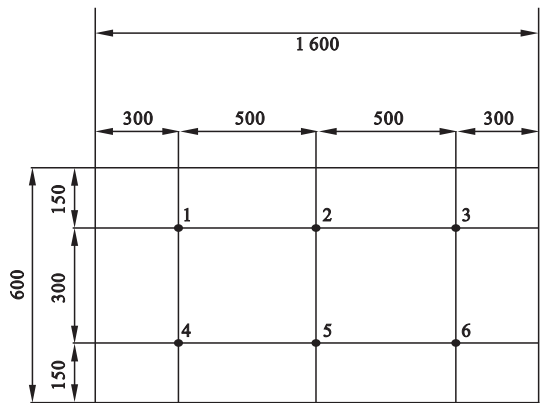


图3 相变蓄能模块表面测点布置图

Fig. 3 Test points arrangement of module surface

本次实验采用对比分析方法,共设置了4种不同的工况.对比的项目包括在相同的相变材料用量的条件下,比较不同供水温度下相变蓄热模块的蓄放热特性以及在相同供水温度的条件下,比较不同相变材料用量的相变蓄热模块的蓄放热特性.本次实验选取测试期间内、室外天气情况基本一致的情况进行对比分析,白天均从同一时刻对不同工况下的相变蓄热模块系统进行供热.

3 实验数据处理及分析

本次实验主要针对前文所设置的4种工况的蓄热和放热过程中的测点进行相关的数据采集以及分析.

3.1 蓄热过程中的温度响应

在实验期间,选取了室外天气情况基本一致的4天分别进行了4种工况下相变蓄热模块蓄热特性的研究.实验过程中,利用热电偶和巡检仪采集了均匀布置在模块表面6个测点的温度,并取其平均值以表征模块的整体表面温度.蓄热过程中,4种工况下的模块表面温度温升情况如图4所示.

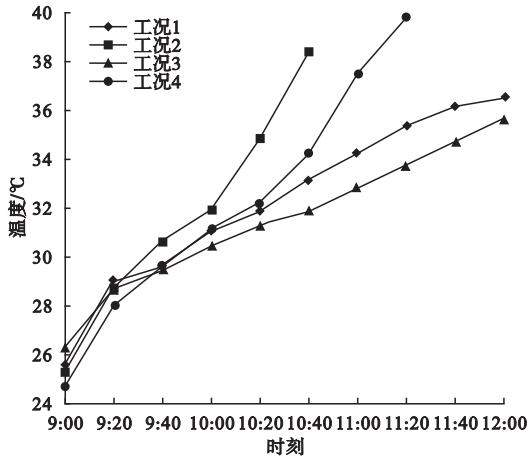


图4 蓄热过程中四种工况下的温升情况

Fig. 4 Temperature curves of thermal storage in four working conditions

由图4可知,蓄热过程的开始阶段即显热蓄热阶段4种工况的温升速率:工况1为 $10.35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况2为 $10.80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况3为 $7.65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况4为 $9.95\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,4种工况温升速率变化不大.由此可知,采用毛细管网型散热末端时,由于单位面积铺设毛细管网的散热面积要远大于其他散热末端,在显热蓄热阶段,模块表面温升快且受供水温度高低以及模块内填充相变材料质量大小的影响很小.

当模块表面温度达到相变温度附近时,此时工况1的升温速率为 $3.43\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况2的升温速率为 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况3的升温速率为 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,工况4的升温速率为 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$.4种工况下的温度升率均开始降低,这是由于模块内封装的相变材料开始发生相变,其温度保持在相变温度附近,蓄热形式为潜热

蓄热;但此时的升温速率同时受到模块内相变材料的填充量和供水温度的影响.相变材料的填充量越少,这个时段的温度升率越大;供水温度越高,温度升率越大.

模块内的相变材料均完全蓄热后,同一时刻模块表面温度由高到低分别为:工况2、工况4、工况1、工况3.这是因为供水温度的不同,导致毛细管网内的热水同模块内相变层的温度梯度不同,由傅里叶定律可知,温度梯度越大,单位时间内所传递的热量也越大,模块所能吸收的热量也越多.

模块表面温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,工况2所需的时间最短,为 80 min ;其次为工况4,为 100 min ,是工况2的1.25倍;再次为工况1,为 120 min ,是工况2的1.5倍;而工况3所需的时间最长,为 160 min ,是工况2的2倍.这是由两方面的因素所决定的:由于组合形式的不同,供水温度和模块内填充的相变材料的质量同时影响着模块表面温度升率和温度变化并体现在蓄热过程中所需的蓄热时间不同.对比工况1和工况2,在模块内填充了相同质量(4 kg)的相变材料的情况下,供水温度更高的工况2($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)的蓄热时间要比工况1($40\text{ }^{\circ}\text{C}$)缩短 40 min ;对比工况3和工况4,在模块内填充了相同质量(5 kg)的相变材料的情况下,供水温度更高的工况4($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)的蓄热时间要比工况3($40\text{ }^{\circ}\text{C}$)缩短 60 min ;对比工况1和工况3,在供水温度同为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,填充了较少相变材料的工况1(4 kg)的蓄热时间要比工况3(5 kg)缩短 40 min ;对比工况2和工况4,在供水温度同为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,填充了较少相变材料的工况2(4 kg)的蓄热时间要比工况4(5 kg)缩短 20 min .根据对用户需求的分析可知,蓄热时间不宜过长,实际应用过程中,可根据所能获取的热源提供的热水温度来考虑相变材料的填充量.

3.2 放热过程中的温度响应

本次实验选取了工况2和工况4下,即

分别封装了 4 kg 和 5 kg 的相变蓄热模块在供水温度为 50 °C 情况下,系统的放热过程作为研究对象. 实验过程中,利用巡检仪采集了均匀布置在模块表面 6 个测点的温度,并取其平均值以表征模块的整体表面温度. 放热过程中,两种工况下的模块表面温度温降情况如图 5 所示.

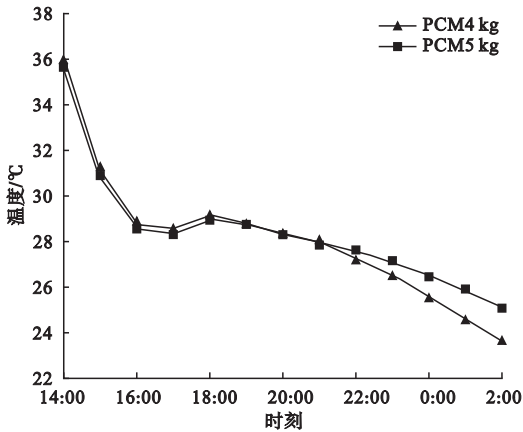


图 5 两种工况下放热过程中的温降情况

Fig. 5 Temperature curves of heat release in two working conditions

由图 5 可见,在放热过程的前中段,两种工况下的温度曲线几乎完全重合在一起,这个阶段的最大温差为起始点 14:00,为 0.48 °C,之后两种工况之间的温差逐渐减小,这是由相变材料在相变过程中保持温度恒定的特性导致的. 由于两种工况下所采用的是同种的相变材料,其相变温度相同,因此在释放潜热的过程中,二者之间的温差逐渐变小. 在放热过程的后半段,工况 2 的温降速率开始变大,而工况 4 的温降速率仍然较低. 这是由于工况 2 下相变蓄能模块内封装的相变材料为 4 kg 比工况 4 下的 5 kg 少,因而其相变潜热也相应地比工况 4 小,在放热过程中,工况 2 在蓄热过程中所蓄存的热量先消耗完,此时温降速率便开始变大,而同一时刻工况 4 在蓄热过程中所蓄存的热量仍未消耗完,其温降速率仍然较低.

在工况 2 下,模块表面温度保持在 25 °C 及以上即保持在舒适温度范围内的时间约为

8 h,除去放热过程前半段的显热放热的时间,单纯的潜热放热的时间约为 6 h;在工况 4 下为 10 h,除去放热过程前半段的显热放热的时间,单纯的潜热放热的时间约为 8 h. 可见,填充了 4 kg 和 5 kg 相变材料的相变蓄热模块均能较好的满足用户对放热时间的要求.

3.3 蓄放热过程中的温度分布均匀性

3.3.1 蓄热过程中的温度分布均匀性

相变蓄热模块供暖系统的优势在于其表面温度的均匀性好,人体热舒适性高. 在本次实验中,分别在相变蓄热模块的头部、中部、尾部分别均匀地布置了两个测点,并通过热电偶联合巡检仪来获取测点温度. 通过对实验数据的整理分析,得出模块表面温度在蓄放热过程中的分布情况.

选取工况 1 下的蓄热过程作为研究对象.

工况 1 下蓄热过程的温度分布如图 6 所示.

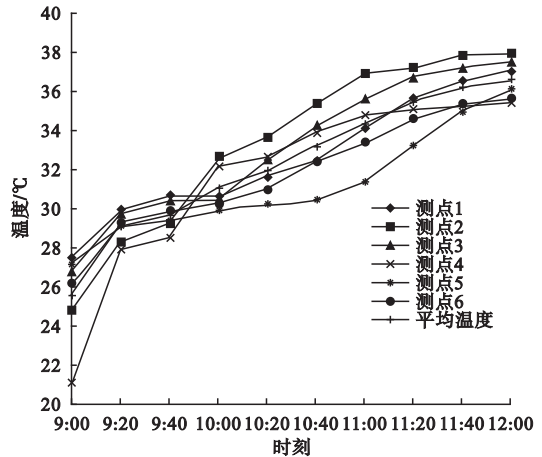


图 6 工况 1 蓄热过程温度分布

Fig. 6 Temperature curves of thermal storage in working condition 1

各个测点之间的最大温差出现在开始供热水的初始时刻 9:00,最大温差为 6.4 °C. 相变过程中的最大温差出现在 11:00,为 5.50 °C,这是由于采用了相变材料热熔分块封装工艺,各个测点之间的相变材料量并不完全一样,相变材料较多的测点温度升率较低,所需要的蓄热时间也更长,温度也相应地

比相变材料少的测点低。

选取工况 2 下的蓄热过程作为研究对象,可以得出工况 2 蓄热过程中的各个测点的温度分布如图 7 所示。

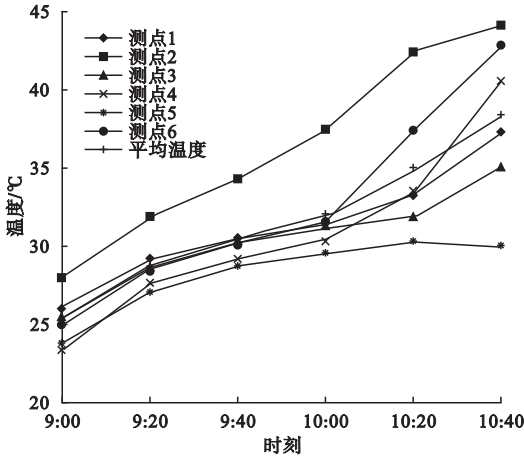


图 7 工况 2 蓄热过程温度分布

Fig. 7 Temperature curves of thermal storage in working condition 2

由图 7 可知,各个测点之间的最大温差为 13.99 °C,出现在 10:40. 此时测点中温度最高的是测点 2,为 42.40 °C;温度最低的是测点 5,为 30.3 °C. 测点 2 内的相变材料已完全熔化,与毛细管网内的热水进行的是显热交换,温度上升快,而测点 3 内的相变材料仍未完全熔化,与毛细管网内的热水仍进行潜热交换,温度上升慢,所以两者之间的才会出现较大的温差,同时这也是由于在工况 2 的条件下,供水温度较高(50 °C)导致的,毛细管网内的热水与相变层内的相变材料之间的温度梯度越大,相变材料的蓄热速率越快,尤其当填充相变材料量较少的时候,这种效应会更加明显。

3.3.2 放热过程中的温度分布均匀性

选取工况 2 下的放热过程作为研究对象. 工况 2 下放热过程的温度分布如图 8 所示. 放热过程中,各个测点之间的最大温差为 8 °C,出现在 2:00;最小温差为 1.5 °C,出现在 18:00,此时,模块表面温度分布均匀性好。

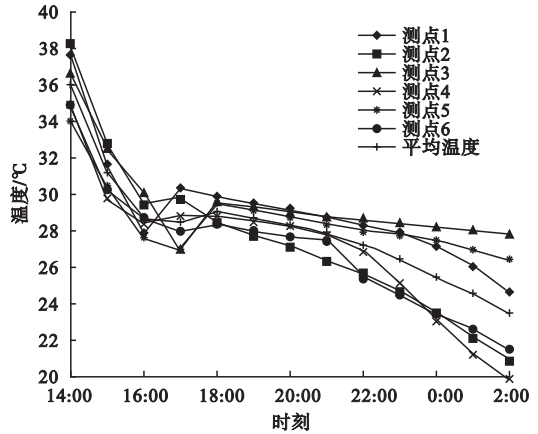


图 8 工况 2 放热过程温度分布图

Fig. 8 Temperature curves of heat release in working condition 2

由工况 2 下放热过程的温度分布图,我们可以通过计算得出温度分布的每个时刻的方差以表征模块表面温度分布的均匀性. 工况 2 下放热过程的方差统计如图 9 所示。

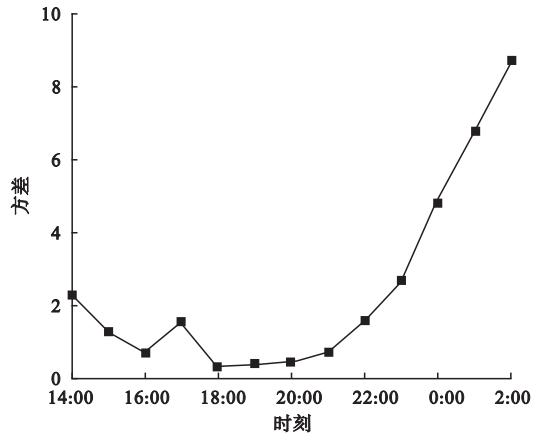


图 9 工况 2 放热过程方差统计

Fig. 9 Variance curve of heat release in working condition 2

由图 9 可以明显看出:当模块内的相变材料发生相变时释放相变潜热时(16:00—22:00),模块表面的各个测点之间的方差小,表明此时模块表面温度分布均匀. 当温度降低到相变温度以下,此时模块与外界环境进行显热交换,模块表面温度降低,温度分布也变得不均匀。

4 结 论

(1)4种工况下,模块内的相变材料均完全蓄热后,同一时刻模块表面温度由高到低分别为:工况2、工况4、工况1、工况3。这是由于供水温度的不同导致毛细管网内的热水同模块内相变层的温度梯度的不同,由傅里叶定律可知,温度梯度越大,单位时间内所传递的热量也越大,模块所能吸收的热量也越多。

(2)4种工况下,模块表面温度从25℃升至35℃所需要的时长从短到长分别为:工况2(80 min)、工况4(100 min)、工况1(120 min)、工况3(160 min)。工况2即填充了4 kg相变材料,供水温度为50℃的温度响应时间最短,能够在较短时间内满足供暖需求。

(3)放热过程中填充了4 kg相变材料和5 kg相变材料的模块表面温度保持在25℃及以上即保持在能够满足人体舒适的温度范围内的时间分别为8 h和10 h。可见二者均能较好的满足用户对模块放热时间的要求。

(4)选取工况2下放热过程各个测点的温度和平均温度制成温度曲线图,并对相关数据做方差分析,结果表明:在相变材料发生相变时段释放相变潜热,各个测点之间的方差小,温度分布均匀。

参考文献

[1] 魏茂丰,陈宝明,李玮,等.相变材料应用于墙体的数值传热研究[J].节能,2016,35(6):28-32.
(WEI Maofeng, CHEN Baoming, LI Wei, et al. Numerical heat transfer of phase change materials applied in the wall[J]. Energy conservation, 2016, 35(6): 28-32.)

[2] 陈泉,张仁元,毛凌波,等.石蜡类相变材料的研究及应用进展[J].材料研究与应用,2008,2(2):89-92.
(CHEN Xiao, ZHANG Renyuan, MAO Lingbo, et al. Progress in research and application of paraffin wax phase change material[J]. Ma-

terial research and application, 2008, 2(2): 89-92.)

- [3] LI Jianli, XUE Ping, HE Hong, et al. Preparation and application effects of a novel form-stable phase change material as the thermal storage layer of an electric floor heating system [J]. Energy and buildings, 2009, 41: 871-880.
- [4] 李磊.低温热水地板辐射采暖技术及其应用[J].墙材革新与建筑节能,2010(7):50-52.
(LI Yun. Low temperature hot water radiant floor heating technology and its applications [J]. Wall material innovation & energy saving in building, 2010(7): 50-52.)
- [5] 赵国强.浅谈低温地板辐射采暖[J].科技传播,2011(7):41-43.
(ZHAO Guoqiang. On low-temperature radiant floor heating [J]. Applied energy technology, 2011(7): 41-43.)
- [6] 杨东.低温热水地板辐射热采暖系统的特点与技术应用[J].科技传播,2011(16):123-125.
(YANG Dong. Low temperature hot water radiant floor heating technology and its feature [J]. Public communication of science & technology, 2011(16): 123-125.)
- [7] 孙敏生,万水娥.北京市地方标准《地面辐射供暖技术规范》(设计部分)介绍[J].暖通空调,2011,41(11):36-44.
(SUN Minsheng, WAN Shui'e. Review of design section of a local code-the technical standard for floor radiant heating [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2011, 41(11): 36-44.)
- [8] 何静,周国兵,冯知正,等.相变材料蓄能式毛细管网地板辐射采暖实验研究[J].太阳能学报,2013,34(10):1802-1809.
(HE Jing, ZHOU Guobing, FENG Zhizheng, et al. Experimental investigation on floor radiant heating using capillary mat and phase change materials for energy storage [J]. Journal of solar energy, 2013, 34(10): 1802-1809.)
- [9] MARKUS K, BEAT L. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings [J]. Energy and buildings, 2009, 36: 567-578.
- [10] 冯国会,崔洁,黄凯良,等.相变储能地板采暖系统蓄放热性能模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(3):30-33.
(FENG Guohui, CUI Jie, HUANG Kailiang, et al. Simulation research on heat storage and

- release of phase change energy storage floor heating system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(3):30-33.)
- [11] 冯国会, 崔浩, 黄凯良, 等. 基于太阳能热水的毛细管网壁面低温辐射采暖系统[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2):320-326.
(FENG Guohui, CUI Hao, HUANG Kailiang, et al. Capillary network low-temperature wall radiant heating system based on solar water [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(2):320-326.)
- [12] FENG Guohui, CHEN Qizhen, HUANG Kailiang, et al. Cool storage time of phase change wallboard room in summer [J]. Journal of central south university, 2010(S1):25-79.
- [13] HUANG Kailiang, FENG Guohui, CHEN Qizhen, et al. Storage and exchange thermal characteristic analysis of phase change wallboard [J]. Journal of central south university, 2010(S1):154-158.
- [14] CAO Guangyu, JUHA J, FENG Guohui, et al. Simulation of the heating performance of Kang system in one Chinese detached house using biomass [J]. Energy and buildings, 2011, 35(4):189-199.
- [15] BERROUG F, LAKHAL E K, ELOMARI M, et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall [J]. Energy and buildings, 2011, 43:3027-3035.
- [16] 吴生俊. 预制轻薄相变供暖地板的制备和实验研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2015.
(WU Shengjun. The preparation and experimental research of prefabricated thin phase change heating floor [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.)
- [17] 李刚, 李小龙, 李世鹏, 等. 太阳能辅助火炕供暖系统热工性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(2):305-311.
(LI Gang, LI Xiaolong, LI Shipeng, et al. Experimental study on solar added kang heating system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(2):305-311.)
- [18] 饶义本. 太阳能热水和热泵复合热源的毛细管网辐射供暖应用研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
(RAO Yiben. A research on radiant heating system coupled with solar hot water and heat pump [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [19] 陈才. 辐射空调末端设备的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
(CHEN Cai. Research on the equipment of terminal heat transfer in radiation air-conditioning [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [20] 陈雅蕾. 毛细管网辐射供暖及节能性分析[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
(CHEN Yalei. Heating properties and energy saving analysis of capillary radiation system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [21] 刘晓蕊, 郑德聪, 张淑娟, 等. 毛细管网辐射空调末端换热性能实验研究[J]. 能源与节能, 2014(12):171-173.
(LIU Xiaorui, ZHENG Decong, ZHANG Shujuan, et al. Experimental study on the heat transfer performance of air conditioning end of capillary network radiation [J]. Energy and energy conservation, 2014(12):171-173.)
- [22] CHIERUZZI M, MILIOZZI A, CRESCENZI T, et al. A new phase change material based on potassium nitrate with silica and alumina nanoparticles for thermal energy storage [J]. Nanoscale research letters, 2015, 10(1):1-10.
- [23] 何静. 相变材料蓄能式毛细管网地板辐射采暖热特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
(HE Jing. Thermal characteristics of floor radiant heating using capillary mat and phase change materials for energy storage [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.)
- [24] 冯国会, 黄凯良, 陈其针, 等. 相变储能地板热水采暖系统实验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, 34(增刊1):52-57.
(FENG Guohui, HUANG Kailiang, CHEN Qizhen, et al. Experimental research on phase change energy storage floor heating system [J]. Journal of Chongqing university (natural science), 2011, 34(S1):52-57.)