

# 周期性环境条件下相变材料对系统热控效果的影响

叶宏<sup>1</sup>, 王子君<sup>1</sup>, 王丽伟<sup>2</sup>, 韦学中<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027;  
2. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

**摘要:**运行于户外周期性环境条件下的热控系统在工业领域有重要应用价值,降低系统能耗和提高温控效果是其性能改进关键所在。为此,采用实验和仿真手段研究了热控系统围护结构中相变材料(PCM)对系统热控效果的影响。典型气象日研究结果表明,相较于聚苯乙烯,PCM在广州地区能显著降低系统能耗(75.4%)、目标表面温度波动幅度(76.1%)和轴向温差(56.9%),在南京和吐鲁番地区可分别降低目标表面温度波动幅度41.3%和30.6%,但对系统能耗和目标轴向温差无改善;典型气象年结果表明,PCM在广州地区同样表现出热控优势,但热控效果对控温设定点、PCM相变范围和环境温度波动有很强的依赖性,当所选PCM相变范围包含控温设定点且与环境温度波动范围一致时,PCM能最大限度提高热控效果。

**关键词:**周期性环境条件;热控系统;相变材料;能耗;控温效果

**中图分类号:**TK121 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2016.10.008

**引用格式:**叶宏,王子君,王丽伟,等. 周期性环境条件下相变材料对系统热控效果的影响[J]. 中国科学技术大学学报,2016,46(10):845-852.

YE Hong, WANG Zijun, WANG Liwei, et al. Effects of PCM on thermal control performance of a thermal control system subjected to periodic ambient conditions[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016,46(10):845-852.

## Effects of PCM on thermal control performance of a thermal control system subjected to periodic ambient conditions

YE Hong<sup>1</sup>, WANG Zijun<sup>1</sup>, WANG Liwei<sup>2</sup>, WEI Xuezhong<sup>2</sup>

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
2. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Thermal control systems operating under periodic outdoor ambient conditions have numerous important applications in the industrial fields, and reducing system energy consumption and enhancing temperature control effects are key to their performance improvement. Therefore, the influences of phase change material (PCM) in the envelope of a thermal control system on thermal control effects were studied by means of experiment and simulation. The results of the typical meteorological day show that, compared with polystyrene, PCM can significantly reduce system energy consumption (by 75.4%), surface temperature fluctuation (by 76.1%) and axial temperature difference (by 56.9%) of the object in

收稿日期:2016-03-16;修回日期:2016-04-21

基金项目:国家自然科学基金(51576188)资助。

作者简介:叶宏(通讯作者),男,1973年生,博士/副教授。研究方向:相变传热与太阳能利用。E-mail: hyc@ustc.edu.cn

Guangzhou. In Nanjing and Turpan, the surface temperature fluctuation can be reduced by 41.3% and 30.6% respectively, no improvement is observed in system energy consumption and axial temperature difference. The results of the typical meteorological year indicate that PCM also exhibits the advantages of thermal control in Guangzhou, but thermal control effects are strongly dependent on the temperature control setpoint, phase change range and the fluctuation of the ambient temperature. When the phase change range of the selected PCM covers the setpoint and the fluctuation range of the ambient temperature, PCM can maximize thermal control effects.

**Key words:** periodic ambient conditions; thermal control system; phase change material; energy consumption; temperature control effect

## 0 引言

相变材料(phase change material, PCM)在相变过程中,可吸收环境的热(冷)量,并在需要时放出热(冷)量,从而实现能量的存储和释放<sup>[1]</sup>.此外相变过程近似等温,利用这一特征可实现对物体的温度控制,即相变温控.因此,PCM的主要应用形式可分为储能和热控两种.正是由于其相变潜热高、相变过程恒温等特性,近年来 PCM 已成为国内外能源利用和材料科学研究的热点,且已被广泛应用于航空航天<sup>[2]</sup>、太阳能利用<sup>[3]</sup>、采暖和空调<sup>[4]</sup>、建筑蓄热<sup>[5-6]</sup>、电子器件散热<sup>[7]</sup>及红外伪装<sup>[8]</sup>等领域.

利用 PCM 潜热进行能量存储是一种有效的储热方式,具有储能密度高、储能过程温度基本不变等优点,不仅可以有效解决能量在时间和空间供需不匹配的问题,也可以提高能源系统的性能和可靠性,现已广泛应用于各种潜热储能系统中,如热泵、太阳能工程、地板采暖等<sup>[9-11]</sup>.

依据控温目标产热模式的不同,相变控温可分为短时温控和周期性温控.短时温控针对具有短时高热或持续不断发热特性的目标,其原理是利用 PCM 的相变潜热来吸收目标产生的热量,在短时间内维持目标表面温度恒定或处于特定范围内,当 PCM 吸热达到饱和后(完全融化),目标温度将会继续升高.对短时温控的研究现已涉及诸多应用领域,如电子设备冷却<sup>[12-14]</sup>、电池控温<sup>[15-17]</sup>、太阳能光伏<sup>[18]</sup>等.周期性温控针对处于周期性环境条件下或具有间歇性发热特性的目标,其原理是当目标处于高温条件或高热时期时,PCM 通过相变吸收环境或目标的热量,维持目标温度在某一温度以下;当目标处于低温条件或低发热期时,PCM 反向相变释放热量,维持目标温度在某一温度以上.简单来说,就是控制目标温度的波动幅度.目前,已有很多学者进行

了 PCM 相变温控的研究,但大多利用的是 PCM 的短时温控原理来实现对目标温度的控制,很少研究在周期性边界条件下,利用 PCM 循环吸放热特性来控温.

本研究的选题背景是一些工业中需要精确控温的目标.目标一般放置于防护设施中,在转移过程和预备状态中会暴露于户外周期性环境条件下.因此,为保证其运行的可靠性,需利用热控系统对其表面温度进行严格控制.作为热控系统的重要组成部分,围护结构是热控系统性能改进的关键所在.因此,为降低系统能耗和提高温控效果,需要深入研究围护结构对系统性能的影响.本工作以一种主动通风式温控系统为研究对象,探讨了周期性边界条件下 PCM 对系统热控效果的影响.首先构建了热控制系统的仿真模型,提出评价目标热控效果的 3 个指标.然后搭建了一套户外实验系统,利用实验结果对仿真模型进行了验证.最后,从典型气象日和典型气象年两个时间尺度探讨了 3 个不同地区热控制系统的传热过程,对比分析了石蜡类 PCM 和聚苯乙烯隔热材料(TIM)热控效果的优劣,提出了 PCM 实现最佳热控效果的条件.

## 1 模型与方法

模型主要由内部控温目标和外部围护结构组成,其结构见图 1 中的箱体.控温目标为直径 218mm、长 1000mm 的实心圆柱,内部材料为特屈儿,外部包覆 2mm 厚的不锈钢;为保证目标的可靠性,其表面温度应尽可能均匀且不随时间波动,这意味着目标所处的热环境必须尽可能稳定.为提供此种环境,需在目标外部设置围护结构和控温系统,以隔绝外界环境周期性波动的影响.由于装置的顶面、南面、东面和西面直接受到太阳辐照,因此在以上 4 个壁面中加入 PCM.围护结构外部尺寸为 1 570

mm×500 mm×670 mm, 顶面、南面、东面和西面 4 个面由外到内分别由 50 mm 厚的聚苯乙烯板、2 mm 不锈钢、30 mm 的 PCM 和 2 mm 不锈钢组成, 北面 and 底面由 80 mm 的聚苯板和 2 mm 不锈钢组成. 围护结构北面开有两个直径为 100 mm 的通风口, 用以通入恒定温度和流率的空气. 作为对比, 将模型中的 PCM 替换成聚苯板, 则为 TIM 系统的结构.

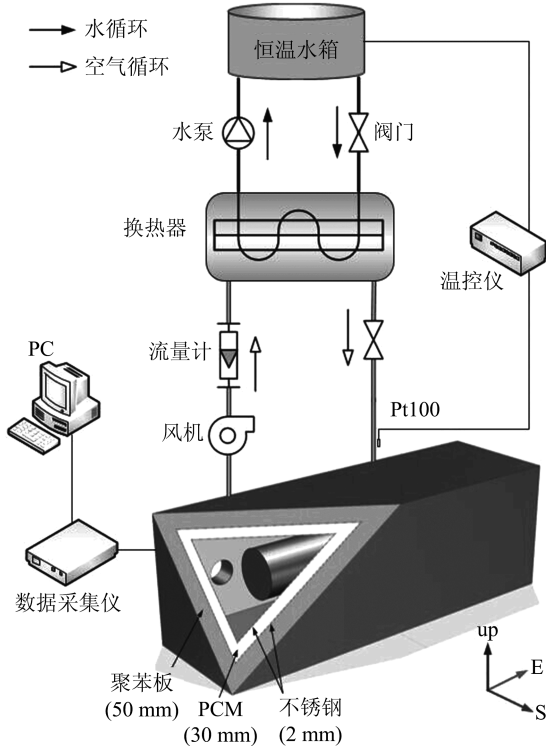


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the thermal control system

系统处于周期性边界条件下, 受到太阳辐照、环境空气温度及天空温度等周期性环境条件的影响. 因此, 围护结构外表面会接受太阳的辐照, 与环境空气进行对流换热, 与天空和地面进行辐射换热. 围护结构外表面与环境空气间的对流换热系数为<sup>[19]</sup>

$$h = 12.263 + 1.766V - 0.0203V^2 \quad (1)$$

式中  $V$  为风速. 围护结构内表面会与目标表面进行

辐射换热, 两者均与内部空气进行对流换热, 对流换热系数取<sup>[20]</sup>

$$h_w = \frac{\rho c_p u_*}{\theta_+} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  是流体密度;  $c_p$  是定压比热容;  $u_*$  是特征流速;  $\theta_+$  为无量纲温度.

热控效果的评价标准主要有 3 个参数: 平均控温功耗、目标表面温度波动幅度和目标轴向温差. 平均控温能耗是指通过围护结构的热损, 不包括外围通风系统及管道的能耗, 表示为

$$q_{\text{sys}} = \frac{\dot{m} c_p \int_0^t |T_{a,i} - T_{a,o}| dt}{t} \quad (3)$$

式中,  $T_{a,i}$  和  $T_{a,o}$  分别为进风温度和出风温度;  $t$  为时间 (周期 24 h);  $\dot{m}$  和  $c_p$  分别为空气的质量流率和比热容. 目标表面温度波动幅度, 即一个周期内目标表面平均温度的波动幅度, 表示为

$$\Delta \bar{T}_a = \bar{T}_{a,\text{max}} - \bar{T}_{a,\text{min}} \quad (4)$$

式中,  $\bar{T}_{a,\text{max}}$  和  $\bar{T}_{a,\text{min}}$  分别为一个周期内平均温度的最大值和最小值.  $\Delta \bar{T}_a$  表征目标表面温度的时间稳定性. 圆柱目标轴向温差表示为

$$\Delta T_{\text{max}} = \max[\Delta T_{\text{max},i}, i = 1, 2, \dots, n] \quad (5)$$

式中,  $\Delta T_{\text{max},i}$  表示一个周期的第  $i$  个时刻沿着流体流动方向目标表面的最大温差;  $\Delta T_{\text{max}}$  表示所有  $\Delta T_{\text{max},i}$  中的最大值, 表征目标表面温度的空间均匀性.

为研究 PCM 对热控系统性能的影响, 采用有限元热分析软件 I-DEAS 对该系统进行实体仿真建模, 网格数已优化, 以确保计算结果与网格密度无关, 并且已消除初始温度的影响. 计算所用材料物性见表 1. 所用 PCM 为石蜡混合物, 由于其相变潜热高、无相分离、较低的过冷度、无腐蚀性<sup>[21]</sup>、可与不锈钢容器兼容等优点, 因此选作相变热控材料. PCM 相变过程的模拟采用有效比热法<sup>[22]</sup>, 有效比热值由差示扫描量热仪 (DSC Q2000, TA) 在 0.1 °C/min 升温速率下测量得到. 测得石蜡相变范围为 25~31 °C, 相变潜热为 125.7 kJ/kg.

表 1 材料物性参数

Tab. 1 Material properties for simulation

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	发射率	吸收率
聚苯乙烯	58.3	0.048	607.8	0.32	0.50
不锈钢	7 900	15.70	460	0.27	
石蜡	762.0	0.290	2 000		
特屈儿	1 670	0.188	1 050		

## 2 实验装置

为确保所建模型能够准确描述热控系统的实际传热过程,需验证其可靠性,因此搭建了一套实验测试系统.实验装置系统结构见图 1,包含两个主要循环,即空气循环和水循环.空气循环由箱体模型、换热器、离心风机、转子流量计和阀门组成,主要作用是箱体提供温度恒定的通风.水循环包括恒温水箱、水泵和阀门等.从方腔流出的空气进入换热器后,与来自恒温水箱的恒温水进行换热,将空气冷却(或加热)到所需温度后通入方腔.其中,在箱体进风口处理了用以反馈调节进风温度的铂电阻 Pt100,通过控温设备可智能调节恒温水箱内的加热和制冷功率,以改变换热器进出口水温,进而使箱体进风温度维持恒定.

考虑到安全性,实验所用圆柱目标内部并未填充特屈儿,而是选择了熔点  $54\text{ }^{\circ}\text{C}$  的石蜡作为替代.为获得圆柱目标表面平均温度,在圆柱体表面均匀布置了 8 个 T 型热电偶.同时在围护结构 6 个内表面和 6 个外表面的中心点各布置了一个热电偶,以测量围护结构各个面的温度变化.为得到系统的控温能耗,在进出风口位置分别布置一个热电偶用于测量进出风温度,在通风管上安装一个玻璃转子流量计以测量空气流率,然后通过进出口空气温差和流率计算得到系统能耗值.另外,还利用小型气象站监测了当地的天气条件,如环境温度、地表温度、风速以及围护结构各个表面受到的太阳辐照强度等.每个传感器间隔  $5\text{ min}$  扫描一次,经数据采集系统将实验数据存储到电脑中.

## 3 结果和讨论

本节首先对比了实验结果与计算结果,以验证模型可靠性.同时为研究 PCM 在不同地区不同气候条件下的热控效果,分别选取了南京、广州和吐鲁番 3 个不同地区的气象数据进行计算,3 个地区分别代表温湿、热湿和热干 3 种典型气候类型,从典型气象日和典型气象年两个时间尺度,对比分析了石蜡和聚苯乙烯对系统能耗和温控效果的影响.各个地区的气象数据从中国建筑热环境分析专用气象数据集获取.

### 3.1 模型验证

实验时设定空气流率为  $65\text{ m}^3/\text{h}$ ,PCM 系统进风温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,TIM 系统进风温度为  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ .实验

于 2015 年 6 月在合肥地区进行,模型计算结果与实验结果的对比见图 2.由于篇幅限制,此处仅给出了圆柱表面平均温度和出风温度这两个关键参数.由计算结果可以看出,无论 PCM 系统还是 TIM 系统,模型计算结果和实测结果均吻合得很好,最大温差不超过  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .考虑到 T 型热电偶的测温误差,仿真结果在可接受范围内,表明模型可准确模拟 TIM 和 PCM 系统的传热过程.由于实验条件的限制,两组实验并没有同时进行,因此,两组实验结果本身并不具有可比性,这里仅用来验证计算模型的正确性.

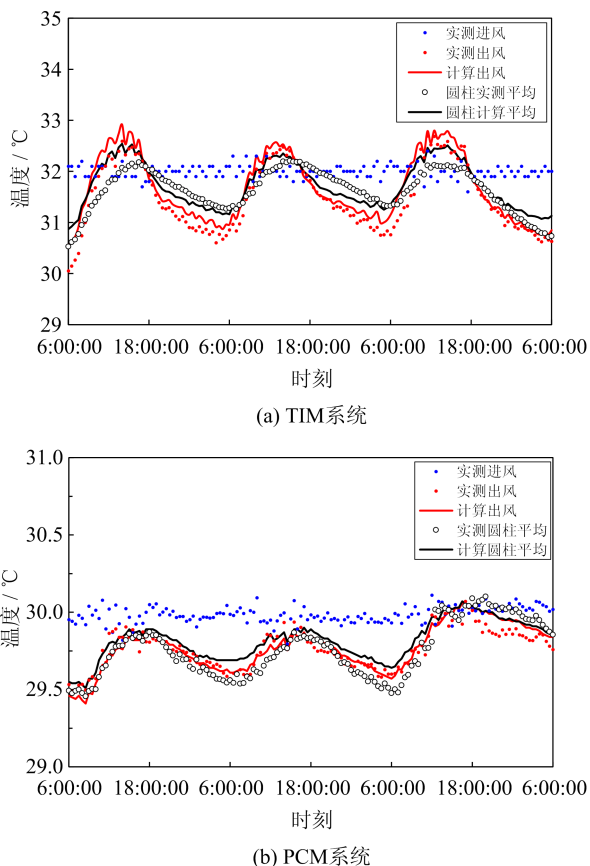


图 2 计算结果与实测结果对比

Fig. 2 Comparison between the simulation and experimental results

### 3.2 典型气象日

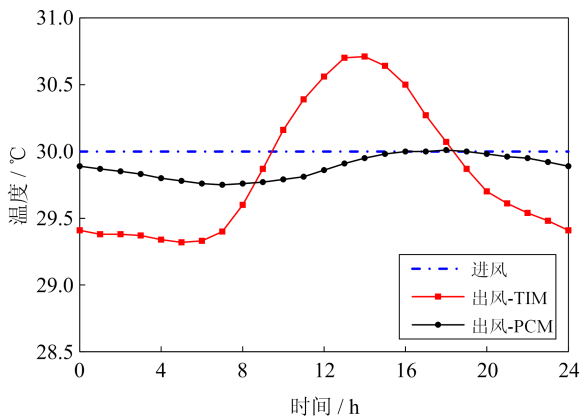
设定进风温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空气流率为  $65\text{ m}^3/\text{h}$ .南京、广州和吐鲁番 3 个地区典型气象日分别为 1 月 10 日(冬季)、9 月 3 日(秋季)和 7 月 29 日(夏季),表 2 给出了 3 个地区典型气象日的系统日平均控温能耗,图 3 给出了广州地区典型气象日的计算结果.由表 2 可知,3 个地区中仅广州地区 PCM 系

统体现出节能的优势,且节能 75.4%。系统能耗  $q_{\text{sys}}$  可由式(3)得到,由表达式可以看出, $q_{\text{sys}}$  主要受到  $\int_0^t |T_{a,i} - T_{a,o}| dt/t$  的影响。因此,出风温度  $T_{a,o}$  越接近进风温度  $T_{a,i}$ , $|T_{a,i} - T_{a,o}|$  的积分结果越小,也即系统能耗越低。结合图 3(a)的进出风温度可以看出,广州地区 PCM 系统的出风温度曲线波动幅度较 TIM 系统小很多,基本维持水平,且十分接近进风温度 30 °C,而 TIM 系统出风温度曲线则在 30 °C 上下做较大幅度的波动,因此广州地区 PCM 系统平均能耗小于 TIM 系统。

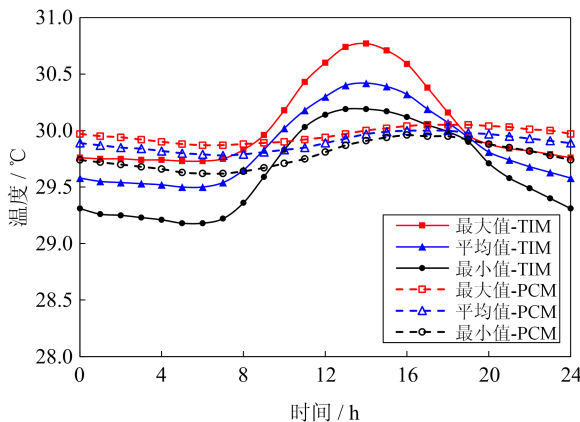
表 2 系统能耗(单位:kJ)

Tab. 2 System energy consumption (unit: kJ)

	TIM 系统	PCM 系统	节能
南京	$5.504 \times 10^3$	$5.893 \times 10^3$	-7.1%
广州	$0.924 \times 10^3$	$0.227 \times 10^3$	75.4%
吐鲁番	$1.569 \times 10^3$	$1.788 \times 10^3$	-14.0%



(a) 进出风温度



(b) 圆柱表面温度

图 3 广州典型气象日计算结果

Fig. 3 The results of TMD (typical meteorological day) in Guangzhou

图 3(b)为广州地区圆柱表面温度的计算结果,可以发现目标表面温度会随室外环境温度呈周期性变化。与 TIM 系统相比,PCM 系统圆柱表面温度波动幅度由 0.92 °C 降低为 0.22 °C,降幅达 76.1%;轴向温差由 0.58 °C 减小为 0.25 °C,降幅达 56.9%。因此广州地区 PCM 系统温控效果明显优于 TIM 系统。南京与吐鲁番两地的 PCM 系统目标表面温度波幅分别降低 41.3% 和 30.6%,但系统能耗和目标轴向温差无改善。

根据以上分析可知,广州地区 PCM 系统各项热控性能均优于 TIM 系统。广州室外空气温度变化范围为 24.0~29.8 °C,与 PCM 相变范围 25~31 °C 相当,因此围护结构内的石蜡能够充分发生相变,从而发挥 PCM 的热控作用。而南京和吐鲁番地区室外空气温度波动范围分别为 -4.6~5.6 °C 和 30.5~44.0 °C,均在 PCM 相变范围之外,因此当外界环境温度变化时,PCM 始终处于固态或液态,并没有发挥相变的作用,此时 PCM 相当于一层隔热材料,但其导热系数却比聚苯板大很多,最终导致控温效果变差。因此,当环境温度波动范围与 PCM 相变范围一致时,才能发挥 PCM 的控温作用。

### 3.3 典型气象年

前面探讨了典型气象日情况下 PCM 的热控性能,但实际应用中热控系统常年开启,因此需了解 PCM 在全年尺度上的热控效果。下面将针对南京、广州和吐鲁番 3 个地区,分别计算热控系统全年的热控指标,计算时通风设置与典型气象日相同。每个地区选择了 3 种不同相变范围的 PCM,以考察相变范围对热控效果的影响,所选相变范围有 5~15 °C, 15~25 °C 和 25~35 °C。

图 4~图 6 分别给出了 PCM 取不同相变范围时广州地区全年的热控效果。由图 4 和图 5 可以看出,当相变范围取 5~15 °C 和 15~25 °C 时,PCM 系统在全年尺度上的热控优势并不明显。由图 6 可以看出,当相变范围取 25~35 °C 时,PCM 系统的目标表面温度波动幅度整体比 TIM 系统小。特别地,在 5 月中旬~10 月中旬时,PCM 系统轴向温差和系统功耗均比 TIM 系统小,此时石蜡的控温效果全面优于聚苯乙烯。由于在 5 月中旬~10 月中旬,广州室外环境温度在 25~35 °C 之间波动,与 PCM 相变范围一致,因此能够充分释放 PCM 的相变潜热,从而控温效果得以体现。这与前面典型气象日的结论一致。同理,南京和吐鲁番的计算结果与广州类似,此

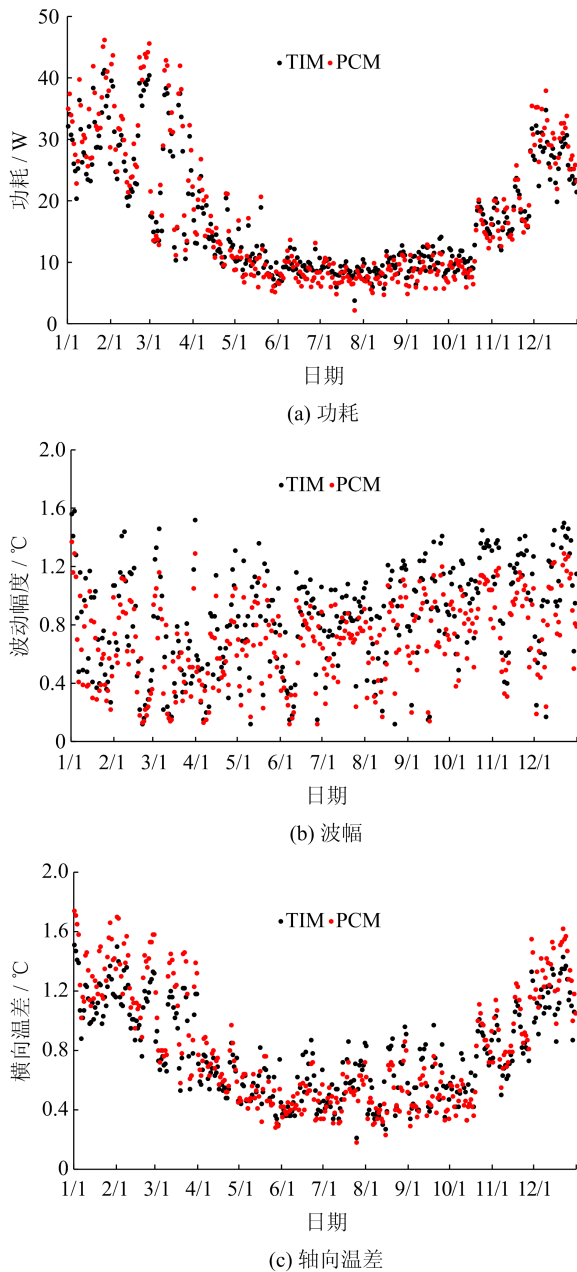


图 4 广州地区全年控温效果:PCM 相变范围 5~15 °C

Fig. 4 Annual thermal control effects in Guangzhou (phase change range 5~15 °C)

处不再给出两地计算结果。

3 个控温参数在全年的平均值见表 3。由平均结果可以看出,PCM 取不同相变范围时,南京地区 PCM 系统均不节能,而在广州和吐鲁番地区,当相变范围取 25~35 °C 时,PCM 系统平均能耗均比 TIM 系统小,表现出节能的优势。对于目标表面温度平均波动幅度,3 个地区的 PCM 系统平均波幅均

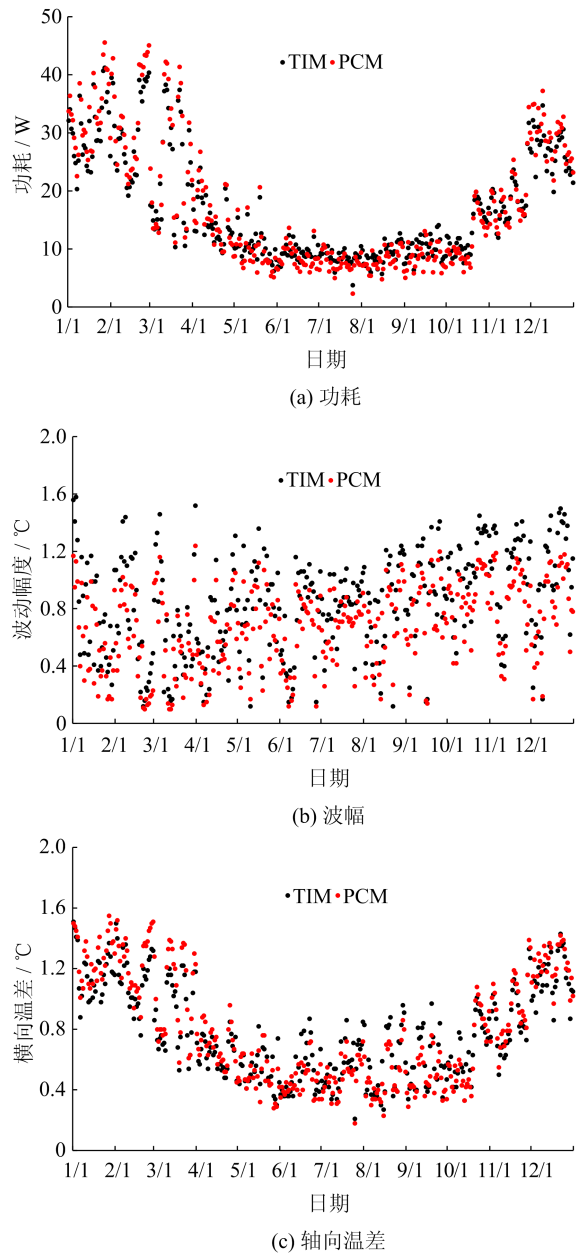


图 5 广州地区全年控温效果:PCM 相变范围 15~25 °C

Fig. 5 Annual thermal control effects in Guangzhou (phase change range 15~25 °C)

比 TIM 系统小。对于目标表面温度轴向温差,当相变范围取 25~35 °C 时,3 个地区的 PCM 系统轴向温差均比 TIM 系统小。同时,随着相变范围的升高,PCM 系统的 3 个热控指标逐渐降低。这是由于相变范围越接近控温设定点 30 °C,发生相变的 PCM 量就越多,热控效果越好。当控温设定点处于相变范围内时,热控效果最优。

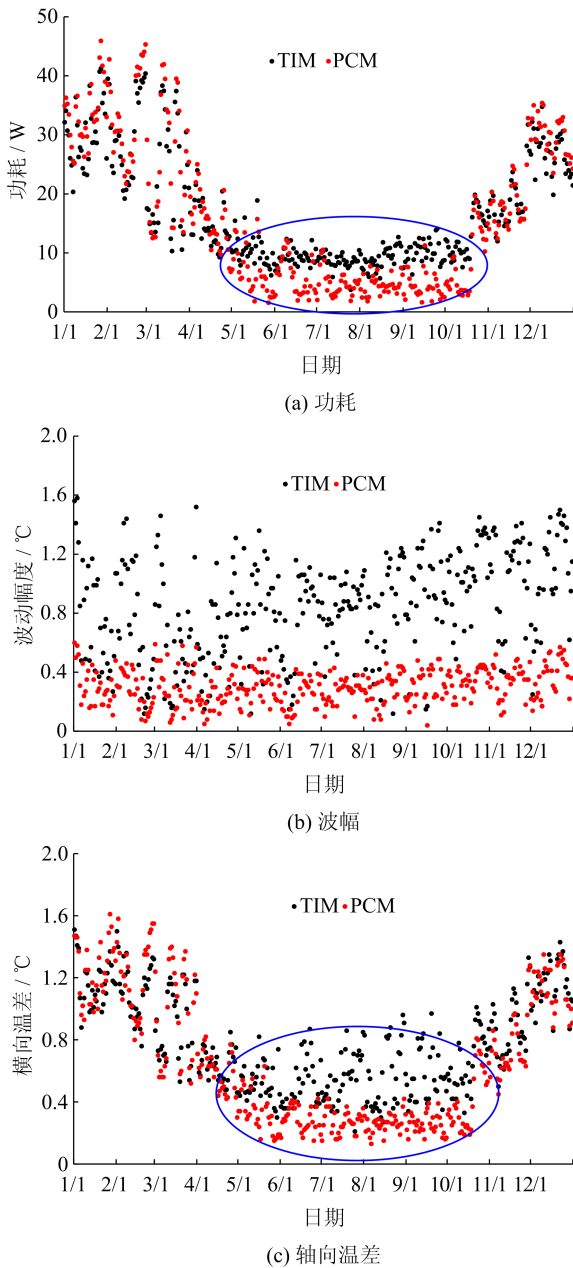


图 6 广州地区全年控温效果:PCM 相变范围 25~35 °C  
Fig. 6 Annual thermal control effects in Guangzhou (phase change range 25~35 °C)

### 4 结论

建立了热控系统的仿真模型,通过计算结果与实验结果的对比较验证了模型的可靠性,并采用此模型探索了周期性环境条件下 PCM 对热控系统能耗和控温效果的影响.典型气象日结果表明,与聚苯乙烯相比,在广州地区 PCM 能显著降低系统能耗 75.4%,减少目标表面温度波动幅度 76.1%和轴向温差 56.9%,南京与吐鲁番地区 PCM 系统目标表

表 3 各地区全年平均热控参数

Tab. 3 Annual average thermal control parameters

地区	材料	相变范围/ °C	功耗/W	波幅/ °C	轴向温差/ °C
南京	TIM		28.95	0.83	1.13
	PCM	5~15	31.27	0.69	1.29
		25~35	30.47	0.37	1.16
广州	TIM		16.96	0.84	0.77
	PCM	5~15	17.41	0.69	0.81
		25~35	15.87	0.30	0.64
吐鲁番	TIM		34.10	1.32	1.47
	PCM	5~15	35.98	1.09	1.63
		25~35	34.0	0.59	1.40

面温度波动幅度分别降低 41.3%和 30.6%,但系统能耗和目标轴向温差无改善.典型气象年结果表明,在全年尺度上南京地区 PCM 系统未表现出节能的优势,而在广州和吐鲁番地区,当 PCM 相变范围取 25~35 °C 时,PCM 系统平均功耗均比 TIM 系统小,表现出节能优势;对于目标表面温度平均波动幅度,3 个地区的 PCM 系统平均波幅均比 TIM 系统小;对于目标表面温度轴向温差,当相变范围取 25~35 °C 时,3 个地区的 PCM 系统轴向温差均比 TIM 系统小.因而,在热控系统围护结构中应用 PCM 时,当相变范围包含控温设定值且与室外温度波动范围一致时,PCM 能最大限度发挥热控作用.

### 参考文献 (References)

[1] YIN H, GAO X, DING J, et al. Thermal management of electronic components with thermal adaptation composite material [J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3 784-3 791.

[2] KANDASAMY R, WANG X Q, MUJUMDAR A S. Application of phase change materials in thermal management of electronics [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(17): 2 822-2 832.

[3] YUAN Y, ZHANG N, TAO W, et al. Fatty acids as phase change materials; A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 482-498.

[4] ZHANG P, MA Z. An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 5 021-5 058.

[5] LONG L, YE H, GAO Y, et al. Performance demonstration and evaluation of the synergetic

- application of vanadium dioxide glazing and phase change material in passive buildings [J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 89-97.
- [6] YE H, LONG L, ZHANG H, et al. The performance evaluation of shape-stabilized phase change materials in building applications using energy saving index [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 118-126.
- [7] LING Z, WANG F, FANG X, et al. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling [J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 403-409.
- [8] HUANG Z H, YU X, LI W, et al. Preparation of urea-formaldehyde paraffin microcapsules modified by carboxymethyl cellulose as a potential phase change material [J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(1): 253-260.
- [9] GUNASEKARA S N, PAN R, CHIU J N, et al. Polyols as phase change materials for surplus thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1439-1452.
- [10] MERLIN K, DELAUNAY D, SOTO J, et al. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage systems: Comparative study of different solutions and thermal contact investigation between the exchanger and the PCM [J]. *Applied Energy*, 2016, 166: 107-116.
- [11] YANG J, YANG L, XU C, et al. Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase-change material [J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 164-176.
- [12] FOK S, SHEN W, TAN F. Cooling of portable handheld electronic devices using phase change materials in finned heat sinks [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(1): 109-117.
- [13] SETOH G, TAN F, FOK S. Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37(9): 1403-1410.
- [14] GE H, LIU J. Keeping smartphones cool with gallium phase change material [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(5): 054503.
- [15] LIN C, XU S, CHANG G, et al. Experiment and simulation of a  $\text{LiFePO}_4$  battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275: 742-749.
- [16] WANG Z, ZHANG Z, JIA L, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 428-436.
- [17] RAO Z, WANG Q, HUANG C. Investigation of the thermal performance of phase change material/minichannel coupled battery thermal management system [J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 659-669.
- [18] MAITI S, BANERJEE S, VYAS K, et al. Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal - wax composite phase change matrix [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 1805-1816.
- [19] ZHANG L, ZHANG N, ZHAO F, et al. A genetic-algorithm-based experimental technique for determining heat transfer coefficient of exterior wall surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(2): 339-349.
- [20] KADER B A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, 24(9): 1541-1544.
- [21] ZHANG P, XIAO X, MA Z W. A review of the composite phase change materials: fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement [J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 472-510.
- [22] AL-SAADY S N, ZHAI Z. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 659-673.