

新型辐射制冷材料—— 相变蓄冷耦合降温屋面的热性能研究

吴智昊, 陈晓明, 逯焕杰, 程归

(福建理工大学 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为提高相变屋面的蓄冷效率和降温效果, 提出了一种新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面。建立了耦合降温屋面的数值计算传热模型。以福州地区为研究对象, 分析了 7 种已商业化相变材料耦合降温屋面的热性能, 并与无新型光谱选择性辐射制冷材料的传统相变屋面和普通屋面进行对比。结果发现, 新型辐射制冷材料可有效降低屋面外表面的温度波动和峰值温度, 提高相变材料的潜热利用率。6 月 1 日至 9 月 30 日期间, 相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面比传统相变屋面可减少 159% 的空调供冷量。室外空气温度与天空有效温度的温差越大, 耦合降温屋面相比于传统相变屋面的节能优势越显著。

关键词: 辐射制冷; 相变; 耦合降温屋面; 相变屋面; 空调供冷量

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0356-07

Thermal performance of a PCM slab roof combined with new radiative cooling materials

WU Zhihao, CHEN Xiaoming, LU Huanjie, CHENG Gui

(School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A PCM slab roof combined with new spectrally selective radiative cooling materials was proposed to improve the cold charging efficiency and cooling effect of PCM slab roof. A computational heat transfer model of the coupled cooling roof was established. Taking Fuzhou area as the research object, the thermal performance of the coupled cooling roofs made of seven commercially available PCMs was investigated and compared with the traditional PCM slab roofs without new radiative cooling materials and ordinary roofs. It is found that the new radiative cooling materials can effectively reduce the temperature fluctuation and peak temperature of the outer surface of the roof, and improve the latent heat utilization rate of the PCM. From June 1 to September 30, the coupled cooling roof with RT25HC PCM can reduce the air conditioning cooling capacity by 159 % compared with the traditional phase change roof. The greater the difference between outside air temperature and effective sky temperature, the more significant the energy saving advantage of the coupled cooling roof compared with the traditional phase change roof.

Keywords: radiative cooling; phase change; combined cooling roof; PCM slab roof; cooling capacity provided by air-conditioners

据统计, 中国空调和采暖约占建筑总能耗的 50%^[1], 碳排放占建筑运行总碳排放的 50% ~

60%^[2]。可见, 降低空调能耗对建筑节能和双碳目标的实现具有举足轻重的作用。

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J01934)

第一作者: 吴智昊(1998—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向: 相变储能、建筑节能技术。

通信作者: 陈晓明(1984—), 男, 福建安溪人, 副教授, 博士, 研究方向: 相变储能技术、建筑节能技术。

将相变材料嵌入到建筑围护结构中,可减少室内温度波动和降低空调能耗^[3-5]。Sharma 等人^[6]研究发现,在墙体和屋面中添加相变材料可分别减少 10.4%~26.6%和 12.6%~36.2%的得热量。Guo 和 Zhang^[7]研究发现,相变墙体在温暖气候地区的节能率比在寒冷气候地区的高。Sun 等人^[8]对相变材料在建筑围护结构中的应用进行了数值模拟,研究发现,气温日较差越大,节能收益越高,对于沈阳、郑州、长沙、昆明和香港地区,夏季 3 个月的节电率分别为 19.4%、17.7%、11.0%、12.3%和 5.0%。

综上所述,相变围护结构的降温效果与气候条件密切相关。对于夏热冬冷地区和夏热冬暖地区,夏季期间的气温日较差较小,夜间温度较高,围护结构如果仅靠对流形式向环境散热,相变材料在夜间难以完全凝固,会导致其在次日无法继续吸热,降低降温 and 节能效果。如何在夜间有限的时间内实现相变材料的快速蓄冷是上述地区应用相变围护结构的关键。

近年来,在太阳辐射波段具有高反射率同时在“大气窗口”波段(主要在 8~13 μm)具有高发射率的新型光谱选择性辐射制冷材料得到了关注^[9-11]。Qin 等人^[12]提出了一种反射率为 95.6%和发射率为 95.95%的辐射制冷涂料,白天的净制冷功率可达 95~115 W·m⁻²。Zhai 等人^[13]提出了一种反射率为 99%和发射率为 97%的辐射制冷涂料,在太阳辐射为 885 W·m⁻²时,涂层的表面温度可低于环境温度 2.31℃,净制冷功率达 68 W·m⁻²。

然而,利用新型光谱选择性辐射制冷材料来提高相变围护结构蓄冷效率和降温效果的研究鲜有报道。因此,本研究建立了新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面的计算传热模型,数值研究了不同相变材料耦合降温屋面的热性能,并与传统相变屋面和普通屋面进行对比。

1 新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面

新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面的构造如图 1 所示。将表面涂刷新型光谱选择性辐射制冷材料的相变材料层布置在屋面的外侧。夜间,在室外冷空气对流换热和天空

辐射的共同作用下,相变材料被冷却和凝固;白天,相变材料吸热熔化,减少外界热量传入室内。辐射制冷材料的涂刷厚度为 400 μm,其太阳辐射吸收率和表面辐射发射率分别为 0.05 和 0.95^[14-15]。选取已商业化的 7 种相变材料进行对比分析,相变材料的厚度为 20 mm^[16-18],屋面各层材料的热物性参数见表 1,相变材料的热物性参数见表 2。

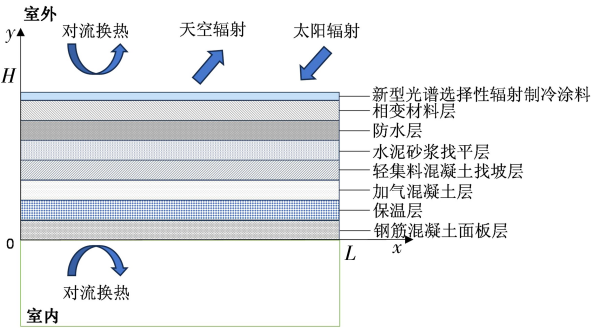


图 1 新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面的构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of PCM slab roof combined with new spectrally selective radiative cooling materials

表 1 屋面材料层热物性参数
Tab.1 Roof materials and their thermophysical properties

材料名称	比热容 c_p / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	表观密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	厚度 δ / mm
水泥砂浆	1.05	1 800	0.930	15
轻集料混凝土	0.96	1 800	0.630	30
加气混凝土	1.05	500	0.140	100
聚苯乙烯塑料	1.38	100	0.047	75
钢筋混凝土	0.92	2 500	1.740	150

2 数学模型

为简化新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面的计算传热模型,假设如下:(1)各层材料分布均匀且各向同性,热物性参数为常数,但相变材料的密度固液相不同,在相变区间内随其温度变化;(2)各层材料紧密接触,无接触热阻;(3)传热过程为二维传热;(4)忽略相变材料在熔化过程中的自然对流。

表 2 相变材料的热物性参数
Tab.2 Thermophysical properties of PCMs

材料名称	相变温度/ ℃	潜热 Q' / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	比热容 c_p / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	表观密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	厚度 δ / mm
RT21	19~24	165	2	880(固相)/770(液相)	0.2	20
RT22HC	20~23	190	2	760(固相)/700(液相)	0.2	20
RT24HC	23~26	200	2	800(固相)/700(液相)	0.2	20
RT25HC	22~26	230	2	880(固相)/770(液相)	0.2	20
RT28HC	27~29	250	2	880(固相)/770(液相)	0.2	20
RT31	29~34	165	2	880(固相)/760(液相)	0.2	20
RT35	32~38	160	2	860(固相)/770(液相)	0.2	20

材料的质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{1}$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; τ 为时间, s; v 为速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

非相变材料的能量方程为：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

式中, T 为温度, K; λ 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; c_p 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; x 和 y 为空间坐标, m。

相变传热采用焓法模型处理, 相变材料的能量方程为^[19]：

$$\frac{\partial (H \rho_p)}{\partial \tau} = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

式中, ρ_p 为相变材料的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为相变材料的总焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 见式(4)^[20]; λ_p 为相变材料的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_p 为相变材料的温度, K。

其中,

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT + \beta Q' \tag{4}$$

其中,

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T < T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中, h_{ref} 为参考焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; β 为相变材料的液相分数; Q' 为相变材料的相变潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; T_{ref} 、 T_s 、 T_1 分别为相变材料的参考温度、凝固温度和熔化温度, K。

边界条件为：

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_{\text{in}} (T_{\text{in}} - T_{\text{in,roof}}) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = \alpha Q_{\text{solar}} + h_{\text{out}} (T_{\text{out}} - T_{\text{ex,roof}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{ex,roof}}^4) \end{cases} \tag{6}$$

式中, h_{in} 为屋面内表面对流换热系数, 取 $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; T_{in} 为室内温度, 取 299.15 K ; $T_{\text{in,roof}}$ 为屋面内表面温度, K; a 为屋面外表面太阳辐射吸收率; Q_{solar} 为太阳辐照强度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; h_{out} 为屋面外表面对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 见式(7)。 T_{out} 为室外空气干球温度; $T_{\text{ex,roof}}$ 为屋面外表面温度, K; ε 为屋面外表面发射率; σ 为黑体辐射系数, 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T_{sky} 为天空有效温度, K。

$$h_{\text{out}} = 2.5 + 2w \tag{7}$$

式中, w 为风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

初始条件为：

$$\tau = 0, T = T_{\text{ini}} \tag{8}$$

式中, T_{ini} 为初始温度, K。

为验证所建计算传热模型的准确性, 将模型预测结果与 Kuznik 和 Virgone^[21] 相变墙体内表面逐时温度的实验结果进行对比, 如图 2 所示。该墙体相变材料的相变温度为 $17.8 \sim 22.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、潜热为 $72.4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图 2 可见, 模型预测与实验结果吻合良好, 最大误差为 8.16% , 平均误差为

4.28%。可见,所建计算传热模型是准确和合理的。

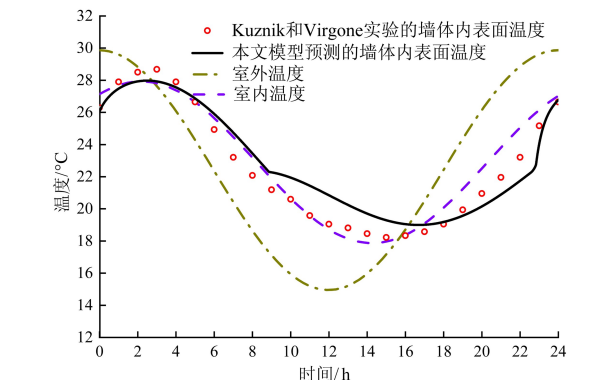


图 2 本研究模型预测相变墙体内表面温度和实验结果的对比

Fig.2 Comparison of internal surface temperature profiles of PCM wall by model prediction and experiment

3 模拟结果分析

以福州地区为研究对象,基于建筑热环境设计模拟分析软件 DeST (Designer's Simulation Toolkit) 提供的典型气象年逐时气象数据^[22],对 7 种已商业化相变材料耦合降温屋面的热性能开展研究,并传统相变屋面和普通屋面进行对比。相比耦合降温屋面,传统相变屋面无新型光谱选择性辐射制冷材料,普通屋面无新型光谱选择性辐射制冷材料无相变材料,其余的构造与耦合降温屋面的相同。模拟时间为 5 月 1 日至 9 月 30 日,为消除初始温度的影响,仅取 6 月 1 日至 9 月 30 日的结果进行分析,气象数据见图 3。此外,为了更好地分析各类型屋面的动态特性,选 8 月 21 日作为代表日进行分析。

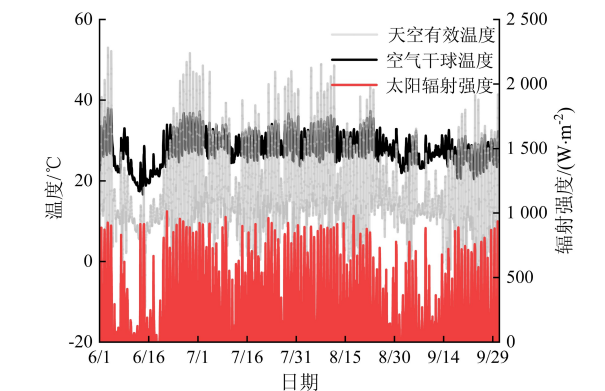


图 3 福州地区气象参数^[22]

Fig.3 Meteorological data in Fuzhou^[22]

开展了网格和时间步长的独立性验证,结果如图 4 所示。可见,1 334 (x) × 130 (y) 和 2 000 (x) × 195 (y) 网格模型的屋面外表面温度和相变材料液相体积分数的相对误差分别仅为 0.04% 和 0.26%。时间步长 120 s 与 100 s 之间的屋面外表面温度和相变材料液相体积分数的相对误差分别仅为 0.03% 和 0.08%,因此,取网格模型为 1 334 (x) × 130 (y) 和时间步长为 120 s 进行计算。

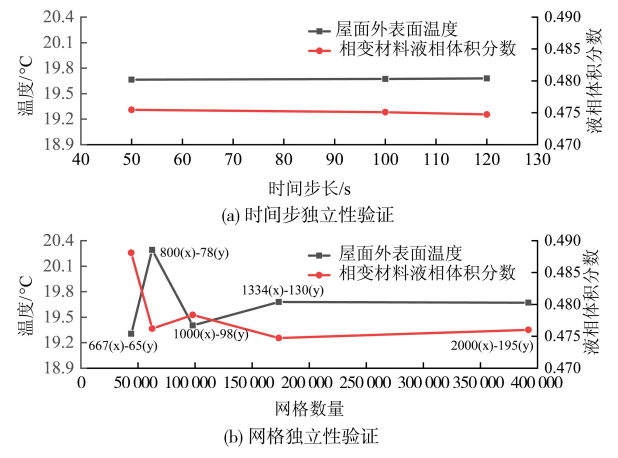


图 4 网格独立性和时间步长独立性的验证结果

Fig.4 Validation results for grid independence and time-step independence

3.1 代表日分析

8 月 21 日不同类型屋面外表面温度和相变材料平均温度随时间的变化如图 5、图 6 所示。图中,RT21 耦合降温屋面代表相变材料为 RT21 的新型光谱选择性辐射制冷材料-相变蓄冷耦合降温屋面;RT25HC 传统相变屋面代表相变材料为 RT25HC 的无新型光谱选择性辐射制冷材料的传统相变屋面;普通屋面代表无新型光谱选择性辐射制冷材料无相变材料的普通屋面,以此类推,下文分析中不再重复说明。

00:00 至 06:00 期间,太阳辐射为 0,室外温度逐渐降低。由图 5 和图 6 可见,00:00~03:00 期间,所有屋面的外表面温度和相变材料温度均随室外温度的降低而降低。但是 03:00 过后,随着室外温度的继续降低,所有屋面的外表面温度连同 RT28HC、RT31 和 RT35 耦合降温屋面的相变材料温度均缓慢升高,而 RT22HC、RT24HC 和 RT25HC 的耦合降温屋面以及 RT25HC 传统相变屋面的相变材料温度却持续缓慢降低。造成上述现象的主要原因是 03:00 后,由于天空有效温度升高,屋面外表面的天空辐射换热强度下降,导致

其受室外冷却的能力下降。相变材料 RT28HC、RT31 和 RT35 在 00:00 之前已实现完全凝固(见图 7),进入到显热换热阶段,温度受外表面换热的影响比较大,而其他相变材料还处于相变换热阶段,温度受外表面换热的影响比较小。

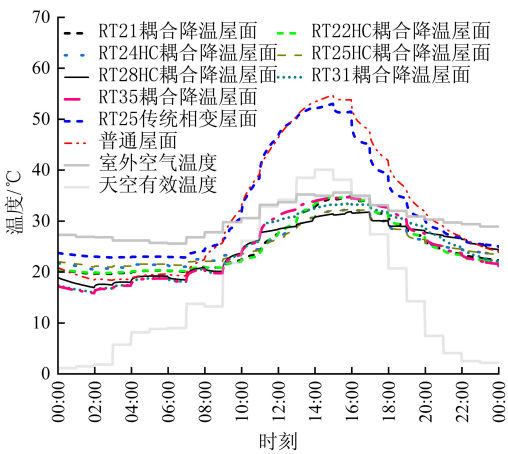


图 5 代表日内不同类型屋面外表面温度随时间的变化
Fig.5 Outer surface temperature versus time of the representative day for various roofs

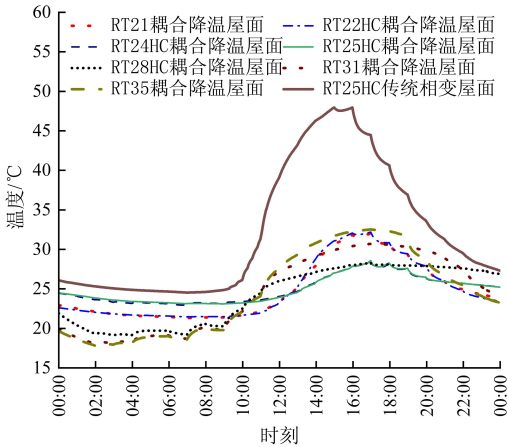


图 6 代表日不同类型屋面相变材料平均温度随时间的变化
Fig.6 Average temperature of PCMs versus time of the representative day for various roofs

06:00 以后,在太阳辐射和室外温度升高的作用下,所有屋面的外表面温度均升高。但耦合降温屋面的外表面温度升高速率远低于传统相变屋面和普通屋面,且依旧低于室外空气温度。下午,随着太阳辐射的减小和室外温度的降低,传统相变屋面和普通屋面的外表面温度在 15:00 开始下降,而耦合降温屋面在 16:00 才开始出现外表面温度下降,即延迟了 1 个小时。这是因为新型辐射制冷材料在太阳辐射波段具有高反射率的同

时在“大气窗口”波段具有高发射率,导致耦合降温屋面比传统相变屋面和普通屋面受室外环境温度和太阳辐射的影响较小。

此外,由图 5 可见,屋面外表面温度波动幅度和峰值温度的最大值均出现在普通屋面,分别为 36.3 ℃ 和 54.7 ℃。对于耦合降温屋面,其外表面的温度波动幅度最大值出现在 RT35,为 18.9 ℃,最小值在 RT25HC,为 11.4 ℃;峰值温度的最大值在 RT22HC,为 35.0 ℃,最小值在 RT28HC,为 31.9 ℃。计算可知,相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面比传统相变屋面可降低 20.6 ℃ 的外表面峰值温度和 18.8 ℃ 的温度波动幅度。

8 月 21 日耦合降温屋面和传统相变屋面的相变材料液相体积分数随时间的变化如图 7 所示。随着时间的推进,耦合降温屋面和传统相变屋面的相变材料液相体积分数均呈现先减小后增大再减小的趋势。随着相变温度的增加,耦合降温屋面的液相体积分数的最大值和最小值均减小,但潜热利用率(液相体积分数的最大值与最小值之差)呈现先增大后减小的趋势,潜热利用率最大值发生在 RT24HC,为 0.90,最小值发生在 RT35,为 0.11。此外,可以发现,RT21、RT22HC、RT24HC 和 RT25HC 在白天可完全熔化,而 RT28HC、RT31 和 RT35 在夜间可实现完全凝固。相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面(潜热利用率为 0.72)比传统相变屋面(潜热利用率为 0.37)可提高 95%的潜热利用率。

8 月 21 日不同类型屋面内表面热流随时间的变化如图 8 所示。可见,所有耦合降温屋面在全天的内表面热流均为正值,表明屋面内表面温度在全天均低于室内温度,屋面向房间提供冷量。传统相变屋面和普通屋面的内表面热流为负值,即为房间的冷负荷。空调供冷量降低的百分比大于 100% 时,表示耦合降温屋面不仅可以完全消除房间通过屋面的得热量,还可以提供额外的冷量。计算可知,RT21、RT22HC、RT24HC、RT25HC、RT28HC、RT31 和 RT35 的耦合降温屋面在当天的累计供冷量分别为 52.73、52.65、40.53、40.77、58.60、66.37、68.32 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。RT25HC 传统相变屋面和普通屋面当天的累计空调冷负荷分别为 145.34 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、135.60 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。结果表明,相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面比传统相变屋面可降低 128% 的空调供冷量,比普通屋面可降

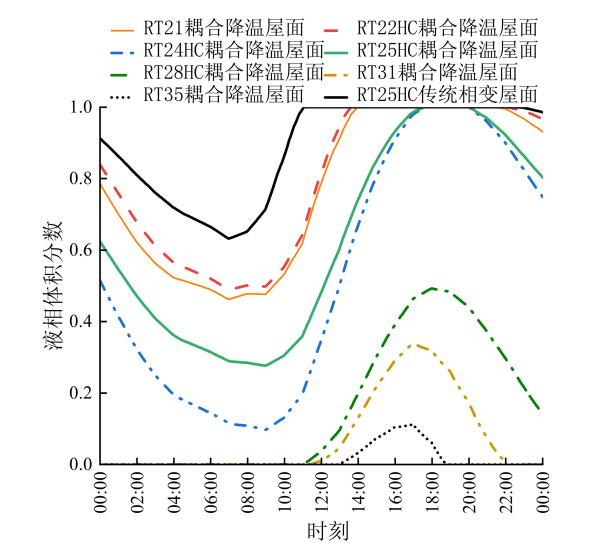


图 7 代表日内不同类型屋面相变材料液相积分数随时间的变化

Fig.7 Average melted fraction of PCMs versus time of the representative day for various roofs

低 130% 的空调供冷量。

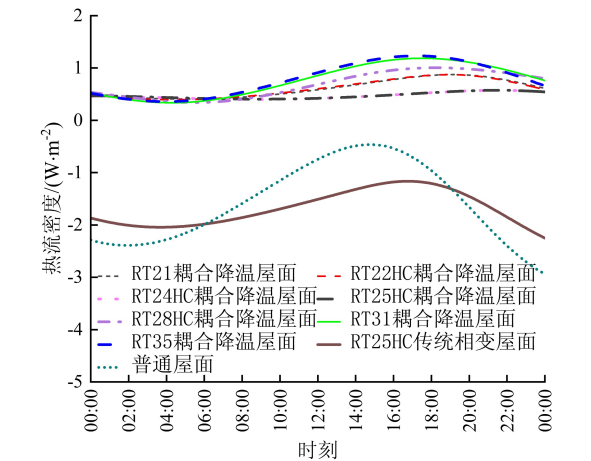


图 8 代表日内不同类型屋面内表面热流密度随时间的变化

Fig.8 Inner surface heat flux versus time of the representative day for various roofs

3.2 供冷期分析

不同类型屋面在 6 月 1 日至 9 月 30 日期间内表面的累计热流如图 9 所示。由图 9 可见,耦合降温屋面在供冷期 4 个月的累计供冷量由小到大的排序为: RT25HC < RT24HC < RT28HC < RT21 < RT22HC < RT31 < RT35。对于 RT25HC 的传统相变屋面和普通屋面的累计冷负荷分别为 12 188、11 213 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。计算可知,RT35 耦合降温屋面比普通屋面在供冷期间可减少 190% 的空调供冷量。相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面比传

统相变屋面和普通屋面可分别减少 159% 和 181% 的空调供冷量。

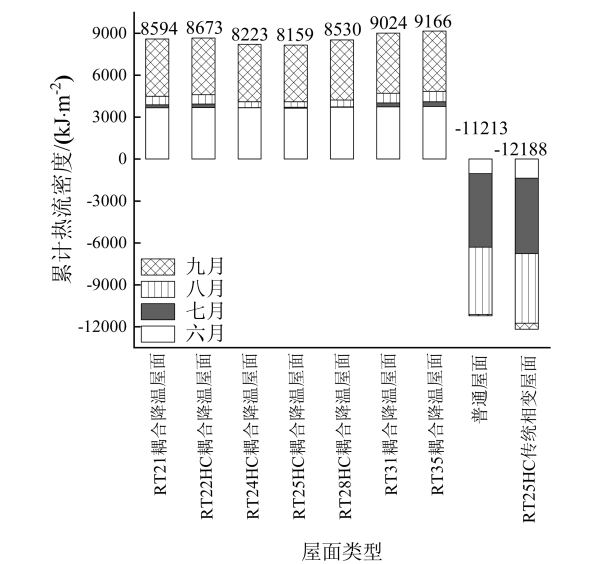


图 9 供冷期不同类型屋面内表面的累计热流

Fig.9 Accumulated heat flux of inner surface versus time for various roofs during the cooling period

相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面相比于传统相变屋面的月平均节能率随室外空气温度和天空有效温度月平均温差的变化如图 10 所示。由图 10 可以发现,室外空气温度与天空有效温度的温差越大,耦合降温屋面相比于传统相变屋面的节能优势越显著。

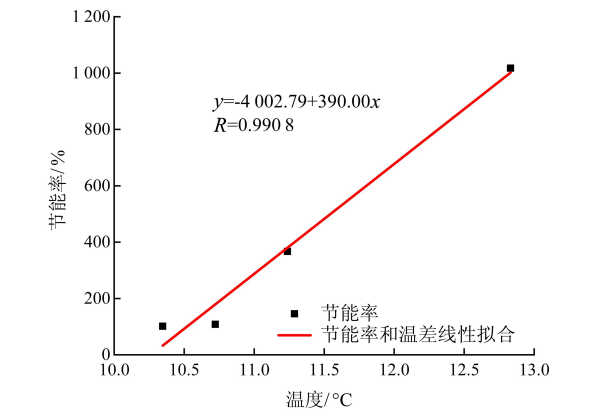


图 10 相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面相比于传统相变屋面的月平均节能率随室外空气温度和天空有效温度月平均温差的变化

Fig.10 Monthly average energy saving ratio obtained by the combined cooling roof using PCM of RT25HC over the traditional PCM slab roof with the same PCM versus the monthly average temperature difference between outside air temperature and sky effective temperature

4 结论

1) 新型光谱选择性辐射制冷材料可有效降低屋面外表面的温度波动和峰值温度, 提高相变材料的潜热利用率。

2) 8月21日相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面比传统相变屋面可降低 18.8 °C 的外表面温度波动, 降低 20.6 °C 的外表面峰值温度和提

高 95% 的相变潜热利用率。

3) 6月1日至9月30日期间, RT35 耦合降温屋面可比普通屋面减少 190% 的空调供冷量, 相变材料同为 RT25HC 的耦合降温屋面可比传统相变屋面减少 159% 的空调供冷量。

4) 室外空气温度与天空有效温度的温差越大, 耦合降温屋面相比于传统相变屋面的节能优势越显著。

参考文献:

- [1] 余才锐, 沈冬梅, 何伟, 等. 基于辐射制冷和微槽道热管的相变墙体实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 123-128.
- [2] 刘伟, 李怀, 黄巍, 等. 基于 TRNSYS 模拟的某近零能耗办公楼暖通空调系统优化配置分析[J]. 建筑科学, 2022, 38(4): 158-168.
- [3] LEE K O, MEDINA M A, SUN X Q, et al. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls[J]. Solar Energy, 2018, 163: 113-121.
- [4] 邹平, 姜鲁艳, 凌浩恕, 等. 应用于日光温室墙体的相变材料热物性优化研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 139-147.
- [5] LEE K O, MEDINA M A. Using phase change materials for residential air conditioning peak demand reduction and energy conservation in coastal and transitional climates in the State of California[J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 69-77.
- [6] SHARMA V, RAI A C. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials[J]. Energy and Buildings, 2020, 208: 109664.
- [7] GUO J Y, ZHANG G L. Investigating the performance of the PCM-integrated building envelope on a seasonal basis[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2021, 124: 91-97.
- [8] SUN X Q, ZHANG Q, MEDINA M A, et al. Energy and economic analysis of a building enclosure outfitted with a phase change material board (PCMB)[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 83: 73-78.
- [9] YIN X B, YANG R G, TAN G, et al. Terrestrial radiative cooling: using the cold universe as a renewable and sustainable energy source[J]. Science, 2020, 370(6518): 786-791.
- [10] SMITH G, GENTLE A. Radiative cooling: energy savings from the sky[J]. Nature Energy, 2017, 2(9): 17142.
- [11] MANDAL J, FU Y K, OVERVIG A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. Science, 2018, 362(6412): 315-319.
- [12] QIN M L, XIONG F, AFTAB W, et al. Phase-change materials reinforced intelligent paint for efficient daytime radiative cooling[J]. iScience, 2022, 25(7): 104584.
- [13] ZHAI H T, FAN D S, LI Q. Scalable and paint-format colored coatings for passive radiative cooling[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 245: 111853.
- [14] 路标, 陶昌军, 向东篱, 等. 辐射制冷涂料用于数据中心机房的节能潜力模拟分析[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(7): 49-54.
- [15] HU M K, SENG LEE P. Performance evaluation of a passive air conditioning module integrating radiative sky cooling and indirect evaporative cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122608.
- [16] LIU Z A, HOU J W, WEI D, et al. Thermal performance analysis of lightweight building walls in different directions integrated with phase change materials (PCM)[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 40: 102536.
- [17] KE W, JI J, ZHANG C Y, et al. Effects of the PCM layer position on the comprehensive performance of a built-middle PV-Trombe wall system for building application in the heating season[J]. Energy, 2023, 267: 126562.
- [18] AL-ABSI Z A, HAFIZAL M I M, ISMAIL M. Innovative PCM-incorporated foamed concrete panels for walls' exterior cladding: an experimental assessment in real-weather conditions[J]. Energy and Buildings, 2023, 288: 113003.
- [19] LU S L, ZHENG J H, WANG R, et al. Thermal performance research on a novel coupled heating system combined solar air heater with ventilation PCM wall[J]. Solar Energy, 2023, 265: 112100.
- [20] LI D, ZHANG C J, LI Q, et al. Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165: 114547.
- [21] KUZNIK F, VIRGONE J. Experimental investigation of wallboard containing phase change material: data for validation of numerical modeling[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(5): 561-570.
- [22] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法——DeST[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

(责任编辑: 方素华)