

双层相变通风屋面的影响因素研究

冷康鑫, 于靖华, 杨清晨, 赵金昱

(华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 在负荷模拟软件 TRNSYS 中建立了带有双层相变通风屋面的建筑模型, 在以武汉市为代表的夏热冬冷地区气候条件下, 分别研究了相变层相变温度范围、相变层厚度和通风速度对屋面热工性能的影响, 并进行优化设计。从空调累积负荷、相变材料利用率和经济性因素考虑高温相变层的最佳相变温度范围为 26~28 °C, 最佳厚度为 30 mm, 最佳通风速度为 2~3 m/s, 低温相变层的最佳相变温度范围为 15~17 °C, 最佳厚度为 20~30 mm。经过优化设计后, 双层相变通风屋面与参照屋面相比, 在供冷期的累积冷负荷可降低 30.18%, 在供热期的累积热负荷可降低 33.92%。

关键词: 相变通风屋面; 相变材料; 夜间通风; 动态热网模型; TRNSYS 模拟

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0910-11

Study on the influencing factors of double-layer phase change ventilation roof

LENG Kangxin, YU Jinghua, YANG Qingchen, ZHAO Jingang

(School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: In the load simulation software TRNSYS, a building model with a double-layer phase-change ventilated roof was established. Under the climatic conditions of hot summer and cold winter regions represented by Wuhan, the effects of phase-change temperature range, thickness of phase-change layer and ventilation speed on the thermal performance of the roof were studied, and the optimal design was carried out. Considering the cumulative load of the air conditioner, the utilization rate of phase change materials and economic factors, the optimal phase change temperature range of the high temperature phase change layer is 26~28 °C, the optimal thickness is 30 mm, and the optimal ventilation speed is 2~3 m/s; the optimal phase change temperature range of the low-temperature phase change layer is 15~17 °C, and the optimal thickness is 20~30 mm. After the optimization design, the cumulative cooling load of the double-layer phase change ventilation roof can be reduced by 30.18% in the cooling period and 33.92% in the heating period compared with the reference roof.

Key words: phase change ventilation roof; phase change material; night ventilation; dynamic heating network model; TRNSYS simulation

随着我国城镇化的快速发展, 能源消耗的需求持续增长。我国能源结构长期以煤炭等化石能源为主^[1], 煤炭在生产和使用过程中产生的 CO₂、SO₂ 等气体是温室效应和大气污染的主要来源, 对生态环境的影响日益突出。在节能减排能源战略的大背景下, 通过持续的技术创新提高能源利用效率, 发展高效清洁能源是我国能源研究领域的重点。

屋面传热是建筑围护结构传热的重要组成部分, 接收太阳辐射得热最多。加强屋面保温节能性能对建筑造价影响不大, 节能效益却很明显。目前, 应用较多的屋面节能技术是通过改进传统屋面的建筑结构, 降低传热系数以减少屋面传递

至室内的热量, 例如保温隔热屋面、倒置屋面、蓄水屋面和绿化屋面等^[2]。近年来, 相变材料因其独特的物理性质而备受关注, 将相变材料应用于建筑结构日益成为节能领域的研究热点。

相变材料在蓄热过程中存在潜热利用率低、蓄热效率差等问题, 为了增加相变材料的蓄热量并减少相变材料在放热过程中传递至室内的热量, 国内外学者在相变蓄热技术的基础上增加了通风层, 使相变材料的潜热得到充分利用。同时, 夜间通风也能有效提高建筑围护结构的蓄热性能^[3-4]。Evola 等^[5]在 PCM 墙板和隔墙之间增加了一个狭窄的空腔, 有效提高了薄墙板微胶囊化相变材料

收稿日期: 2021-06-26

修改稿日期: 2021-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778255)

第一作者: 冷康鑫(1996—), 男, 硕士生, 主要从事建筑围护结构节能。E-mail: m201873673@hust.edu.cn

通信作者: 于靖华(1981—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事可再生能源与能源综合利用。E-mail: yujinghua@hust.edu.cn

的有效性. Gonzalo 等^[6]提出了一种在外墙包含 PCM 的主动通风式立面, 与传统墙面相比带有 PCM 的通风幕墙的热惯性和热响应均有提高. 胡志鹏等^[7]提出将通风节能墙板与含有相变材料的石膏板结合, 在 CFD 软件中构建数值模型以研究其热工性能. 刘江等^[8]运用 EnergyPlus 数值模拟软件研究了相变通风技术在西安地区典型办公建筑不同季节的应用情况. 谢静超等^[9]将相变构件与机械通风相结合, 测试了不同风速下相变材料的蓄热性能, 提高送风速度和送风温度可提高相变材料液化过程中的平均热流. 张磊等^[10]对某高校宿舍楼的室内热环境进行实验研究, 发现采用蓄热通风技术的房间, 相变材料表面温度远低于室内壁面温度. Prabhakar 等^[11]通过模拟研究发现采用基于温度控制的夜间自然通风可使相变材料的利用效率得到大幅提升. Mechouet 等^[12]将机械通风与相变外墙相结合, 发现机械通风可显著提升室内热舒适度, 降低冷负荷, 并缩短相变材料投资的回收期.

现已有较多学者将相变材料与通风技术应用用于建筑围护结构中以降低空调负荷, 但将相变材料与夜间通风耦合应用于屋面的研究较少; 且多为分析特定气象日的空调负荷, 对屋面全年热工特性的研究较少. 本文提出双层相变通风屋面, 该屋面的主体结构是在普通预制混凝土空心屋面的基础上增加了两层相变材料. 本文用热阻热容方法建立了相变通风屋面结构的简化动态热网模型, 并利用 TRNSYS 软件模拟相变通风屋面的全年工况, 以相变材料利用率和空调负荷为评价指标分析其热性能, 并对该屋面相变材料的相变温度、相变层厚度和通风速度做出优化设计.

1 模型建立

1.1 双层相变通风屋面结构

双层相变通风屋面是集相变储能技术和通风技

术于一体的新型围护结构, 能充分发挥相变材料单位体积储热量高的特点, 有效提高屋面围护结构的热工性能, 并降低室外气候变化对室内环境产生的影响, 从而减少空调能耗. 双层相变通风屋面结构如图 1 所示. 结构层尺寸参照《预应力混凝土空心板 02G09》图集中单个 YKB4262 型预应力混凝土空心板的尺寸.

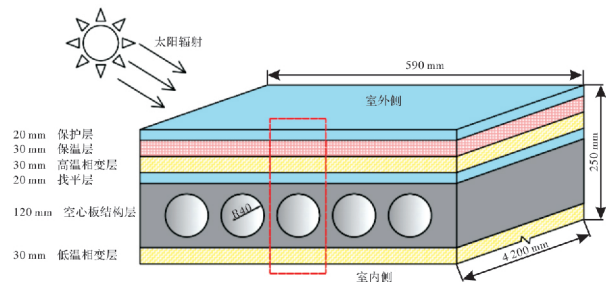


图 1 双层相变通风屋面结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of double-layer phase change ventilation roof structure

该屋面的结构从上至下依次为保护层、保温层、高温相变层、找平层、空心板结构层(通风层)、低温相变层. 其中保护层、找平层和空心板结构层为普通预制混凝土屋面的基础结构, 起到保护建筑材料、防水渗漏、平整屋面和支撑屋面的作用; 保温层主要用于减少夏季高温和冬季低温对室内环境的影响, 提高屋面的保温隔热性能; 高温相变层的相变温度较高, 主要在夏季发挥作用, 白天由于高温熔化而吸收热量, 夜间则在室外空气温度降低和通风的作用下凝固放热, 为了避免热量传向室内, 将高温相变层置于通风层之上; 低温相变层的相变温度较低, 主要在冬季发挥作用, 将低温相变层置于最内侧可使相变材料在凝固时放出的热量能更多地传递至室内. 双层相变通风屋面各层的材料选择及其热物性如表 1 所示.

表 1 屋面各层的材料热物性参数

Tab. 1 Material thermal properties of each layer of the roof

屋面结构	材料	厚度/mm	密度 /kg · m ⁻³	比热 /J · (kg · K) ⁻¹	导热系数 /W · (m · K) ⁻¹	潜热 /kJ · kg ⁻¹
保护层	水泥砂浆	20	1 800	1 050	0.93	/
保温层	聚苯乙烯泡沫	30	18	2 400	0.06	/
高温相变层	石蜡 _ 石墨 _ 聚乙烯	30	766	2 145	1.48	144
找平层	水泥砂浆	20	1 800	1 050	0.93	/
空心板结构层	混凝土	120	2 500	920	1.74	/
低温相变层	石蜡 _ 石墨 _ 聚乙烯	30	880	2 076	1.48	116

1.2 简化动态热网模型的建立

传统的相变材料传热模型一般采用有效焓法、有效热容法进行数值模拟分析,这种传热模型的准确度高,但计算效率低、耗时长,往往只能模拟在典型气候日下的传热过程.相对而言,围护结构在全年工况下的负荷特性更具有参考价值 and 实用意义,因此许多学者将围护结构中热流的传递与电路中电流的传递相类比,采用热容热阻法(RC 模型)建立简化的传热模型^[13],模拟更长时间范围内的传热.与传统的数值模拟方法相比,RC 模型的热流误差小于 10%^[14],计算效率高,输出结果快,可用于研究围护结构在全年工况下的负荷特性.

双层相变通风屋面的简化动态热网模型(RC 模型)如图 2 所示,其中 R 为热阻、 C 为热容、 T 为温度.

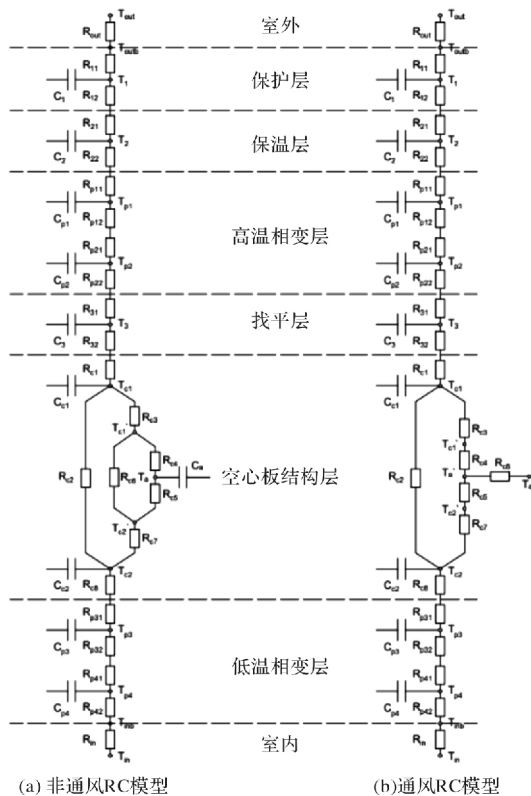


图 2 简化动态热网模型

Fig. 2 Simplified dynamic heating network model

在非通风工况下,空腔内的空气温度随热流的变化而变化,是模型的输出数据;而在通风工况下,空腔内的空气温度为室外空气温度,是模型的输入数据.因此需根据空腔是否通风建立非通风工况和通风工况两种 RC 模型.

在 MATLAB 通过编程描述简化动态热网模型的传热方程组,输入室内外气候参数、屋面各层的等效热阻和等效热容后,可输出屋面各层的热流和节点温度,从而实现对双层相变通风屋面的传热过程的快速求解.

在 RC 模型的计算中,相变材料的热阻设为定值,与相变材料状态无关.当相变层温度低于相变温度范围下限(固相线)时为固态,高于上限(液相线)时为液态,此时热容按照表 1 中数值计算,处于相变温度范围内为固液共存状态,将热容设定为材料本身热容与单位温度变化潜热量之和.

1.3 TRNSYS 平台的建立

本文在 TRNSYS 平台上搭建了一栋位于武汉市的单层办公建筑物,建筑长 12 m、宽 10 m、高 3 m,房间面积为 120 m².通过 TRNBuild 设置该建筑的围护结构参数、室内扰动、新风供给及空调系统.建筑围护结构的热工特性如表 2 所示,其中屋顶为双层相变通风屋面,其相变材料的厚度、相变温度等热物性参数仍需优化,可通过编写的 MATLAB 程序设置.

表 2 办公建筑围护结构的热工特性

Tab. 2 Thermal characteristics of office building envelope

建筑构件	构成材料	厚度/m	传热系数/[W · (m ² · K) ⁻¹]
外墙	水泥砂浆、砖块、聚苯乙烯泡沫	0.3	1.043
屋顶	双层相变通风屋面	—	—
楼地	混凝土、水泥砂浆、石块	0.425	1.022
外窗	双层玻璃	—	1.4

依据《实用供热空调设计手册》^[15]中办公室的相关设计参考值,夏季供冷时室内空气温度为 26℃,室内空气的相对湿度为 60%;冬季供热时室内空气温度为 18℃,室内空气的相对湿度为 45%.该建筑的人员密度为 8 m²/人,办公室共 15 人;新风量为 30 m³/(h · 人),换气次数为 1.25 次/h;照明强度为 11 W/m²,设备强度为 20 W/m²;人员活动强度为极轻活动,相对应的人均产湿量为 0.102 kg/(h · 人),人均发热量为 66 W.人员作息时间为每周工作日的早八点至晚六点.

武汉夏季供冷期为 6 月 1 日至 9 月 30 日,冬季供热期为 11 月 15 日至 3 月 15 日^[16].TRNSYS 模拟采用的武汉典型年水平面太阳辐射及室外空气干球温度如图 3 所示.

带有双层相变通风屋面的建筑的 TRNSYS 模型如图 4 所示.本文搭建的 TRNSYS 模型用于模拟武汉市典型年气候参数下双层相变通风屋面对建筑负荷的影响,模拟时间为 8 760 h,时间步长为 3 min.模型中调用的 MATLAB 程序是双层相变通风屋面的 RC 模型传热方程组,可模拟屋面在不同保温层厚度、相变层厚度、相变温度和通风

速度下的热工性能。模型能通过模块 Type65 将全年逐时室内空气温度、屋面内表面温度、相变层

节点温度、建筑冷负荷和建筑热负荷等模拟结果输出,方便数据分析和研究。

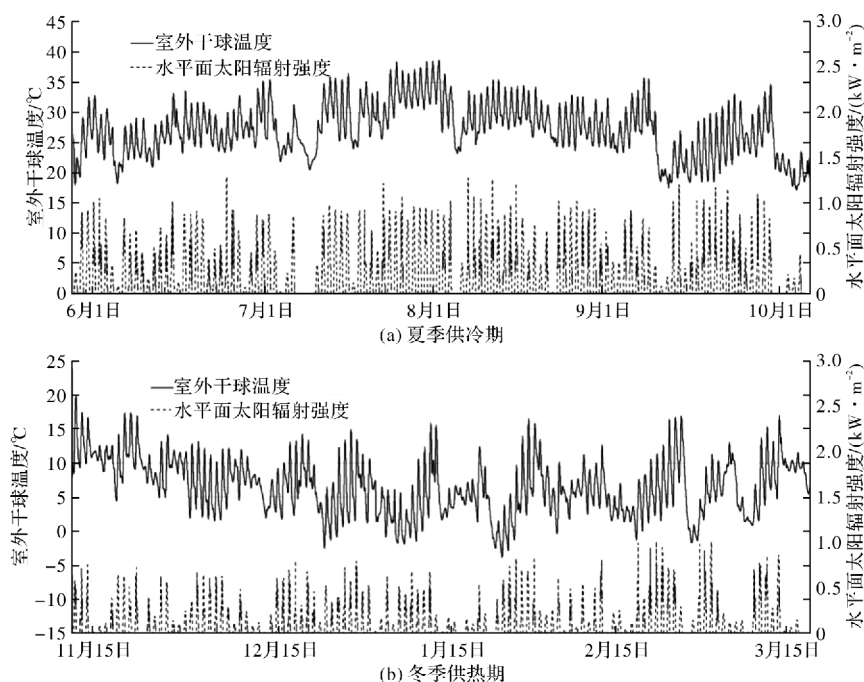


图3 武汉典型年水平面太阳辐射及室外空气干球温度

Fig. 3 Horizontal solar radiation and outdoor air dry bulb temperature in Wuhan in typical years

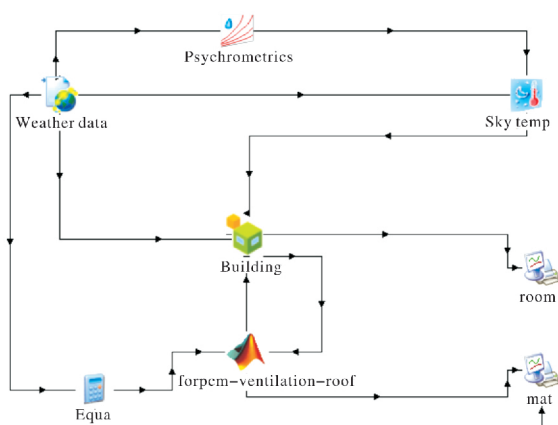


图4 带有双层相变通风屋面建筑的 TRNSYS 模型

Fig. 4 TRNSYS model of a building with a double-layer phase-change ventilation roof

2 影响因素研究

双层相变通风屋面的主要特点是利用两层不同相变温度的相变材料的储热能力及夜间通风技术以提高屋面全年的热工性能,降低空调负荷,而相变层的厚度及相变温度范围,对其适用气候及储热能力影响最为显著,夏季夜间通风速度则会影响夜间的冷却效果,故本节主要针对两相变层的温度范围、相变层厚度及通风速度研究屋面的优化结构。

2.1 高温相变层的相变温度范围

相变温度范围是指相变材料发生相变过程的温度范围,这种参数是影响高温相变层储热性能

的重要因素,若相变温度范围过高,则高温相变层长时间处于固态,难以融化吸热,降低白天的蓄热效果,若相变温度范围过低,则高温相变层长时间处于液态,难以凝固放热,减少夜间通风带走的热量^[17]。

在武汉供冷期气象条件下模拟了双层相变通风屋面(高温相变层厚度 30 mm,通风速度 2 m/s)在高温相变层的相变温度范围不同时的传热过程。为了更清晰地分析相变温度范围对液相率的影响,图 5 统计了高温相变层在不同相变温度范围时整个供冷期的液相率以及处于完全固态(相变层温度小于等于固相线温度,液相率等于 0)、完全液态(相变层温度大于等于液相线温度,液相率等于 1)和融化状态(相变层温度介于固相线温度与液相线温度之间)的时间占比。

分析图 5 中的“完全固态”曲线和“完全液态”曲线可知,相变材料处于完全固态的时间随相变温度范围的增加而增加,处于完全液态的时间随相变温度范围的增加而减少。这是因为当相变温度范围较低时,室外环境传递至高温相变层的温度往往高于相变温度范围,相变材料在高温的作用下融化,所以相变材料处于液态的时间较多,处于固态的时间较少。而随着相变温度范围的升高,室外环境传递至高温相变层的温度维持不变,相变温度范围开始逐渐高于室外环境传递至高温相变层的温度,所以相变材料处于液态的时间变少,

处于固态的时间变多,“融化状态”时间占比呈现先升高后降低的趋势。相变温度范围在 $26\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,“融化状态”时间占比最大,即相变材料在整个供冷期发挥作用的时间最长,利用率最高,相变材料处于融化状态的时间为 $1\,567.1\text{ h}$,占整个供冷期时间的 53.54% 。

供冷期的空调冷负荷是围护结构节能性的最直观体现。图6列出了高温相变层的相变温度范围

不同时建筑的供冷期累积冷负荷和最大冷负荷。从图中可以看出,建筑的累积冷负荷呈现先降低后升高的趋势,相变温度范围为 $26\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时累积冷负荷达到最小值,为 $4\,858.63\text{ kW}\cdot\text{h}$,此时相变材料发挥了最佳的蓄热功能。空调的最大冷负荷也是先降低后升高的趋势,相变温度范围为 $30\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大冷负荷达到最小值,为 24.56 kW 。

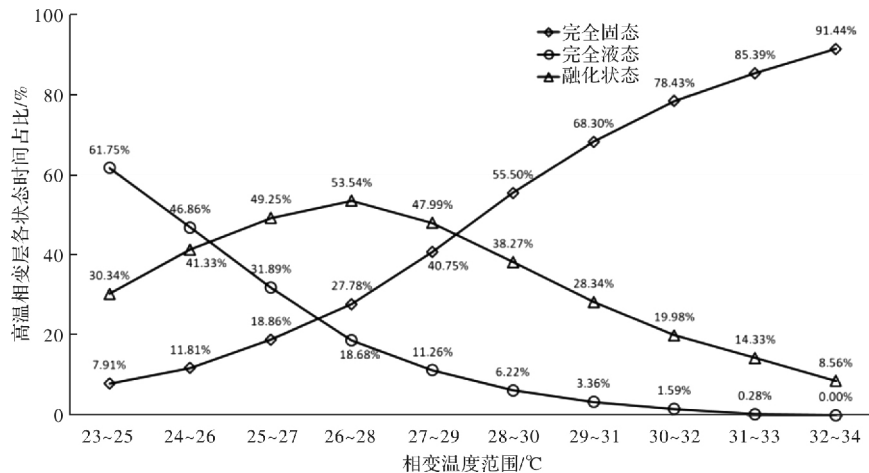


图5 高温相变层在不同相变温度范围时的液相率

Fig. 5 Liquid phase ratio of high temperature phase change layer in different phase change temperature range

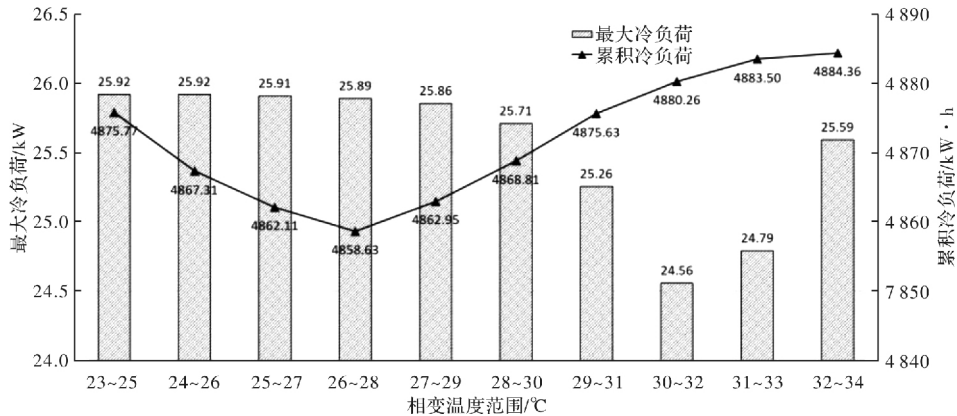


图6 不同相变温度范围时空调的供冷期冷负荷

Fig. 6 Cooling load of air conditioner in cooling period in different phase change temperature range

2.2 高温相变层的厚度

相变层厚度是影响高温相变层储热量大小的重要因素。单位体积的相变材料的潜热一定,相变层越厚,高温相变层的体积越大,其潜热也越大。白天在太阳辐射的作用下,室外温度急剧升高,若高温相变层太薄,高温相变层的储热能力不足以吸收室外传递的热量,导致大部分热量传递至室内。若高温相变层太厚,则在室外温度较高的情况下,高温相变层仍然有未融化的材料,降低相变材料的利用率^[17]。

在武汉供冷期气象条件下模拟了双层相变通

风屋面(高温相变层相变温度范围 $26\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$,通风速度 2 m/s)在高温相变层厚度不同时的传热过程。图7统计了高温相变层在厚度不同时整个供冷期的液相率。

图7中的“完全固态”曲线和“完全液态”曲线大致呈下降趋势。在相变层厚度小于等于 40 mm 时,相变材料处于完全固态和完全液态的时间随相变层厚度的增加而减少。这是因为当相变层厚度较薄时,相变材料的潜热小,很容易在室外环境的影响下变成完全液态或完全固态,相变层厚度的增加提高了相变材料的总潜热,使得相变材料处于融化状态的

时间增加。“融化状态”曲线呈现先升高后降低的趋势。高温相变层厚度为 40 mm 时相变材料的利用率最高,相变材料处于融化状态的时间为 1 595.7 h,占整个供冷期时间的 54.51%。

本研究模拟计算了高温相变层厚度不同时空调的供冷期累积冷负荷和最大冷负荷,如图 8 所

示。高温相变层越厚,空调累积冷负荷和最大冷负荷越低。但随着相变层厚度的增加,屋面热性能改善的收益逐渐变少,相变层厚度从 10 mm 加至 15 mm 时,累积冷负荷降低了 8 kW·h,而相变层厚度从 30 mm 加至 35 mm 时,累积冷负荷只降低了 3 kW·h。

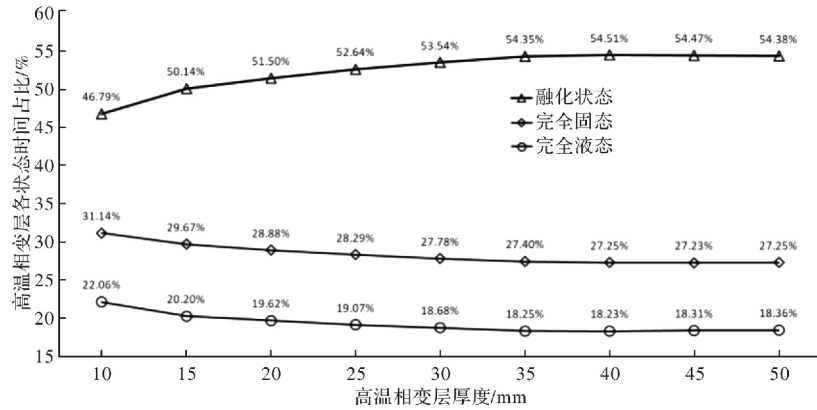


图 7 高温相变层厚度不同时的液相率

Fig. 7 Liquid phase ratio with different thickness of high temperature phase change layer

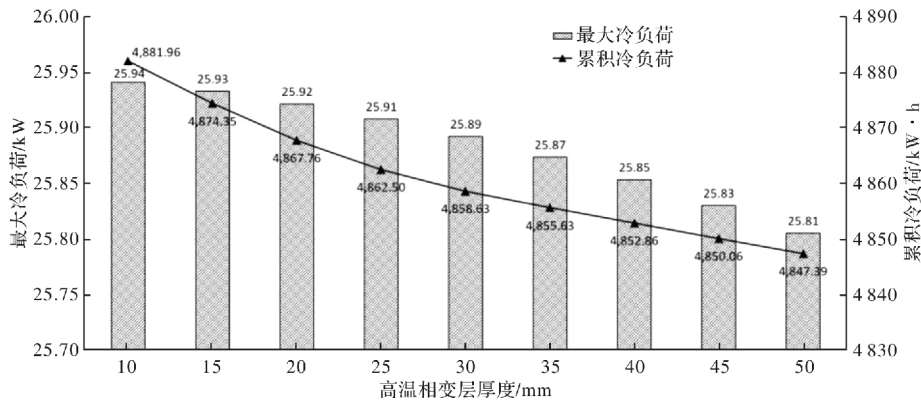


图 8 高温相变层厚度不同时空调的供冷期冷负荷

Fig. 8 Cooling load of air conditioner in cooling period with different thickness of high temperature phase change layer

2.3 通风速度

通风速度影响了高温相变层的蓄热性能,进而影响双层相变通风屋面的节能效果,若通风速度太小,则相变材料在夜间的凝固放热效果不佳,若通风速度太大,则对屋面热性能提升的收益不再明显^[17]。

在武汉供冷期气象条件下模拟了双层相变通风屋面(高温相变层厚度 40 mm,相变温度范围 26~28 ℃)在通风速度不同时的传热过程。机械通风能加快相变材料的凝固放热速度,所以通风速度影响了相变材料的利用率和储热效果。图 9 列出了不同通风速度的屋面在整个供冷期的液相率。

分析图 9 中的“完全固态”曲线、“完全液态”曲线和“融化状态”曲线可知,相变材料处于完全固态的时间随通风速度的增加而增加,处于完全液

态的时间随通风速度的增加而减少,处于融化状态的时间随通风速度的增加而减少。机械通风加快了高温相变层的相变材料在夜间凝固放热的效率,在相变材料释放相同热量的情况下,通风使得相变材料从融化状态变成完全固态的时间变短,所以通风速度越大,相变材料处于完全固态的时间越长,而处于融化状态的时间越短。

本研究模拟计算了通风速度不同时建筑的供冷期累积冷负荷和最大冷负荷,如图 10 所示。通风速度越大,空调累积冷负荷和最大冷负荷越低。但随着通风速度的增加,屋面热性能改善的收益逐渐变少,通风速度从 0 m/s 加至 0.5 m/s 时,累积冷负荷降低了 88 kW·h,而通风速度从 4 m/s 加至 4.5 m/s 时,累积冷负荷只降低了 11 kW·h。通风速度为 2~3 m/s 时,机械通风的节能收益最好。

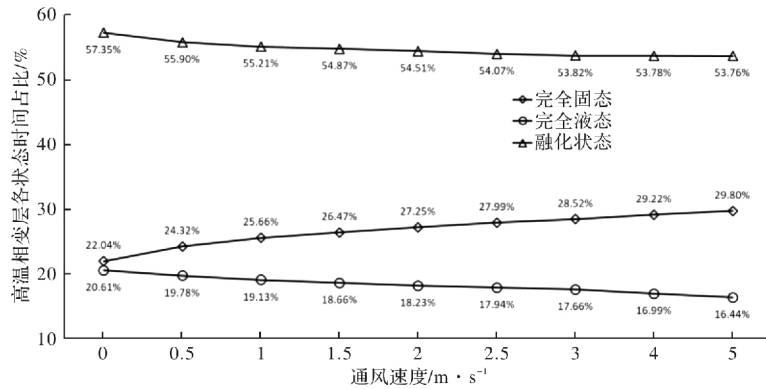


图 9 通风速度不同时的液相率

Fig. 9 Liquid phase ratio at different ventilation speeds

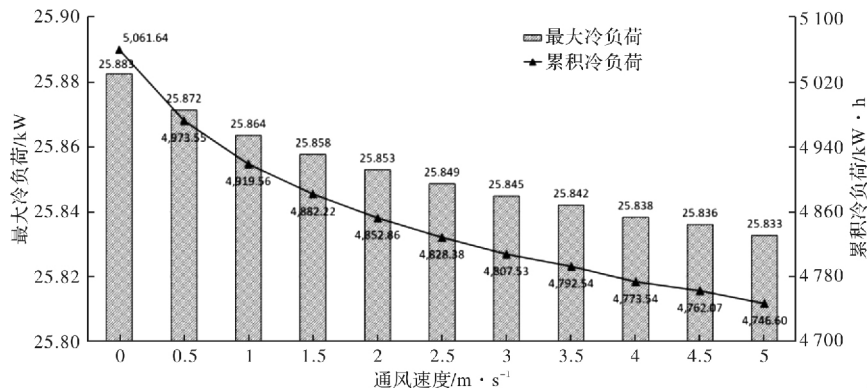


图 10 通风速度不同时空调的供冷期冷负荷

Fig. 10 Cooling load of air conditioner in cooling period at different ventilation speeds

2.4 低温相变层的相变温度范围

低温相变层位于屋面的最底端,与室内空气直接接触,因此低温相变层在白天主要依靠室内的空调散热和室外传热储存热量,而在夜间向室内释放热量,提高屋面内表面的平均温度,并降低刚开启空调时空调需承担的热负荷,减轻室内供暖负担。供热期工作时间的室内空气温度设定为 18℃,选取与之匹配的低温相变层的相变温度范围十分重要。

在冬季供热期,双层相变通风屋面关闭机械通风,此时高温相变层始终处于固相状态,不发挥作用。在武汉供热期气象条件下模拟了双层相变通风屋面(关闭机械通风,低温相变层厚度 30 mm)在低温相变层的相变温度范围不同时的传热过程。

为了保证低温相变层能发挥蓄热作用,其相变温度范围不宜超过 18℃的室内空气温度,所以本节模拟计算了低温相变层相变温度范围为 12~14℃、13~15℃、14~16℃、15~17℃、16~18℃和 17~19℃时整个供热期的液相率以及处于完全固态、完全液态和融化状态的时间,如图 11

所示。

分析图 11 中的“完全固态”曲线和“完全液态”曲线可知,相变材料处于完全固态的时间随相变温度范围的增加而增加。这是因为当相变温度范围较低时,室内空气传递至低温相变层的温度往往高于相变温度范围,相变材料在高温的作用下融化,所以相变材料处于液态的时间较多,处于固态的时间较少。而随着相变温度范围的升高,室内空气传递至低温相变层的温度维持不变,相变温度范围开始逐渐高于室内空气传递至低温相变层的温度,所以相变材料处于液态的时间变少,而处于固态的时间变多。

图 11 中的“融化状态”曲线呈现先升高后降低的趋势。相变温度范围在 13~15℃时,相变材料的利用率最高,相变材料处于融化状态的时间为 1955.25 h,占整个供热期时间的 67.33%。相变温度范围为 12~14℃、13~15℃、14~16℃和 15~17℃时,相变材料处于融化状态的时间较长,均高于 40%。

供热期的空调热负荷是围护结构节能性的最直观体现。图 12 列出了低温相变层的相变温度范

围不同时建筑的供热期累积热负荷和最大热负荷。从图中可以看出,建筑的累积热负荷呈现先降低后升高的趋势,相变温度范围为 $15\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时累积热负荷达到最小值,为 $1\,851.50\text{ kW}\cdot\text{h}$,此时相变材料发挥了最佳的蓄热功能。

空调的最大热负荷是逐渐升高的趋势,相变

温度范围为 $12\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大热负荷达到最小值,为 48.36 kW 。这是因为空调的最大热负荷出现在室外温度最低时,而较低的相变温度范围能使低温相变层在室外温度较低时仍然能发挥蓄热作用,提高屋面内表面温度的最低值,从而降低空调负荷,减少供热期空调的最大热负荷。

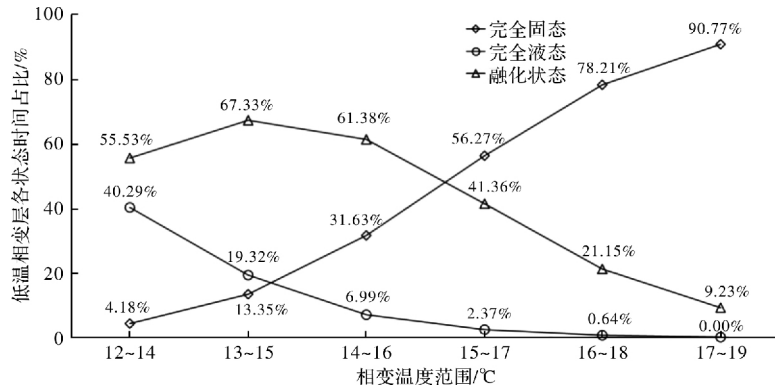


图 11 低温相变层在不同相变温度范围时的液相率

Fig. 11 Liquid phase ratio of low temperature phase change layer in different phase change temperature range

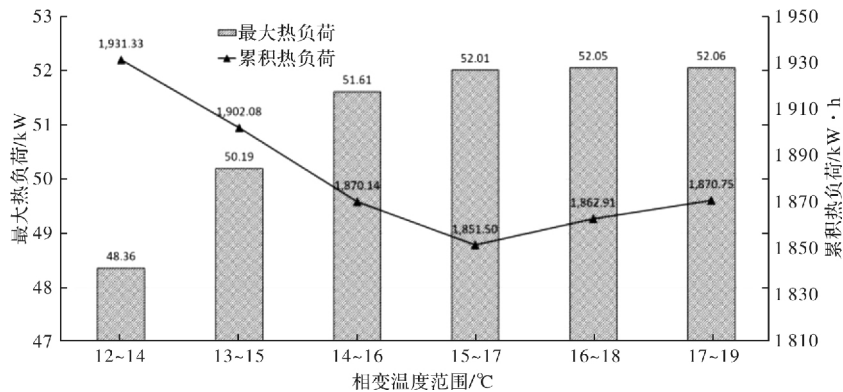


图 12 不同相变温度范围时空调的供热期热负荷

Fig. 12 Heat load of air conditioner during heating period in different phase change temperature range

2.5 低温相变层的相变层厚度

相变层厚度是影响低温相变层储热量大小的重要因素。若低温相变层太薄,低温相变层的储热能力不足以吸收室内传递的热量,导致冬季的大部分热量传递至室外。若低温相变层太厚,则低温相变层会有未融化的材料,降低相变材料的利用率。

在冬季供热期,双层相变通风屋面关闭机械通风,此时高温相变层始终处于固相状态,不发挥作用。在武汉供热期气象条件下模拟了双层相变通风屋面(关闭机械通风,低温相变层相变温度范围为 $15\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$)在低温相变层的厚度不同时的传热过程。图 13 统计了低温相变层在厚度不同时整个供热期的液相率。

从图 13 中可以看出,“完全固态”曲线和“完全液态”曲线大致呈下降趋势,“融化状态”曲线呈现上升趋势。这是因为相变层较厚时,相变材料的潜热变大,蓄热能力更强,使得相变材料处于融化状态的时间增加,处于完全液态和完全固态的时间变少。

本研究模拟计算了低温相变层厚度不同时空调的供热期累积热负荷和最大热负荷,如图 14 所示。低温相变层越厚,空调累积热负荷和最大热负荷越低。但随着相变层厚度的增加,屋面热性能改善的收益逐渐变少,相变层厚度从 10 mm 加至 20 mm 时,累积冷负荷降低了 $18.5\text{ kW}\cdot\text{h}$,而相变层厚度从 30 mm 加至 40 mm 时,累积冷负荷降低了 $13.3\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

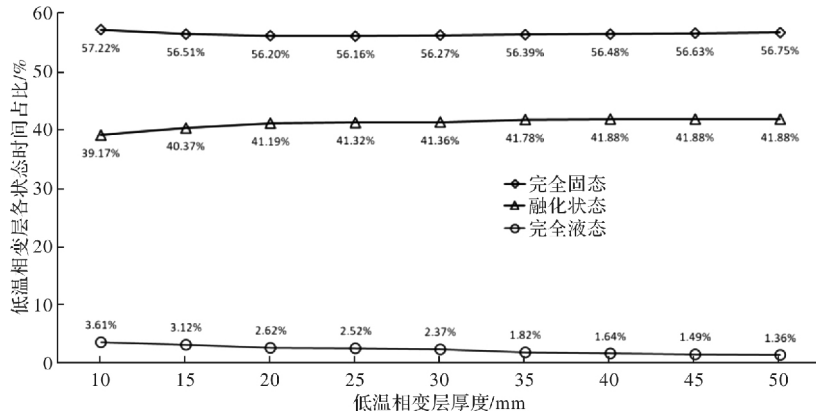


图 13 低温相变层厚度不同时的液相率

Fig. 13 Liquid phase ratio with different thickness of low temperature phase change layer

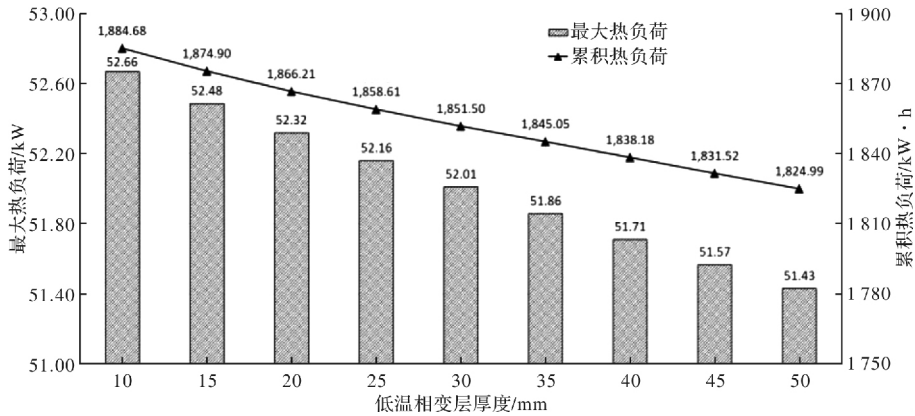


图 14 不同相变温度层厚度时空调的供热期热负荷

Fig. 14 Heat load of air conditioner during heating period in different thickness of high temperature phase change layer

3 节能效果分析

根据上一节的研究结论,双层相变通风屋面的最佳结构为:高温相变层厚度 40 mm,相变温度范围 26~28 ℃,通风层的通风速度 2 m/s,低温相变层厚度 30 mm,相变温度范围 15~17 ℃.此时屋面在供冷期的累计冷负荷为 4 807.53 kW·h,在供热期的累计热负荷为 1 866.21 kW·h.

为研究双层相变通风屋面对建筑空调负荷的影响,更直观地分析该新型屋面的节能潜力,本文设置“参照屋面”进行对比分析,即将双层相变通风屋面结构中的高温相变层和低温相变层用相同厚度的水泥砂浆代替,同时关闭空心板结构层的通风口.在相同的室外气候条件和室内扰动下,模拟“参照屋面”在全年的屋面内表面温度、建筑空调冷负荷和建筑空调热负荷.

表 3 对比了双层相变通风屋面和参照屋面在供冷期的冷负荷值.双层相变通风屋面在供冷期的最大冷负荷为 25.85 kW,与参照屋面相比减少了 20.47 kW,最大冷负荷降低 44.19%.累积冷负荷为 4 807.53 kW·h,与参照屋面相比减少了 2 078.03 kW·h,累积冷负荷降低 30.18%.

表 3 双层相变通风屋面和参照屋面的空调冷负荷

Tab. 3 Air conditioning cooling load of double-layer phase-change ventilated roof and reference roof

冷负荷值	双层相变通风屋面	参照屋面	降低百分比/%
最大冷负荷/kW	25.85	46.32	44.19
供冷期累积冷负荷/kW·h	4 807.53	6 885.56	30.18

表 4 对比了双层相变通风屋面和参照屋面在供热期的热负荷值.双层相变通风屋面在供热期的最大热负荷为 52.32 kW,与参照屋面相比减少了 6.53 kW,最大热负荷降低 11.10%.累积热负荷为 1 866.21 kW·h,与参照屋面相比减少了 968.41 kW·h,累积热负荷降低 33.92%.

表 4 双层相变通风屋面和参照屋面的空调热负荷

Tab. 4 Air conditioning heat load of double-layer phase-change ventilated roof and reference roof

热负荷值	双层相变通风屋面	参照屋面	降低百分比/%
最大热负荷/kW	52.32	58.85	11.10
供热期累积热负荷/kW·h	1 866.21	2 854.62	33.92

4 结论

本文在负荷模拟软件 TRNSYS 中建立了带有双层相变通风屋面的建筑模型,模拟了屋面在武汉市气候条件下的全年传热过程,并建立“参照屋面”进行比较.研究了高温相变层的相变温度范围和相变层厚度、通风速度以及低温相变层的相变温度范围和相变层厚度对双层相变通风屋面热工性能的影响,并对屋面做出优化设计,结论如下:

(1)高温相变层的最佳相变温度范围为 $26\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$,最佳厚度为 40 mm ;通风速度越大,空调累积冷负荷和最大冷负荷越低.但随着通风速度的增加,屋面热性能改善的收益逐渐变少,通风层的最佳通风速度为 $2\sim 3\text{ m/s}$;低温相变层的最佳相变温度范围为 $15\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温相变层的最佳厚度为 $20\sim 30\text{ mm}$.

(2)经过优化设计后,双层相变通风屋面在供冷期的累积冷负荷为 $4\ 807.53\text{ kW}\cdot\text{h}$,与参照屋面相比减少了 $2\ 078.03\text{ kW}\cdot\text{h}$,累积冷负荷降低 30.18% .屋面在供热期的累积热负荷为 $1\ 866.21\text{ kW}\cdot\text{h}$,与参照屋面相比减少了 $968.41\text{ kW}\cdot\text{h}$,累积热负荷降低 33.92% .

以上研究基于武汉(夏热冬冷地区)的气候条件和办公建筑的建造及使用情况,结论可外推至相同气候条件下的同类建筑.

参考文献 References

- [1] 许江风. 中国能源战略发展关键问题思考[J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 22-23.
XU Jiangfeng. Discuss on key problems of energy development strategy in China [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 22-23.
- [2] 毕博. 建筑工程屋面节能技术探究[J]. 居舍, 2019, 36: 51.
BI Bo. Research on energy-saving technology of building engineering roof[J]. Wushe, 2019, 36: 51.
- [3] 朱新荣, 杨雯, 杨柳, 等. 夜间通风建筑关键设计参数优化分析[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2016, 48(3): 401-405.
ZHU Xinrong, YANG Wen, YANG Liu, et al. Optimization on critical design parameter of night ventilation buildings [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48 (3): 401-405.
- [4] 朱新荣, 杨柳, 刘加平, 等. 夜间通风空调办公建筑降温参数分析[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2009, 41(6): 846-850.
ZHU Xinrong, YANG Liu, LIU Jiaping, et al. Parameter analysis of night ventilation in air-conditioned office building [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2009, 41 (6): 846-850.
- [5] EVOLA G, MARLETTA L, SICURELLA F. Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings [J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 480-489.
- [6] DIARCE G, URRESTI A, GARCÍA-ROMERO A. Ventilated active façades with PCM [J]. Applied Energy, 2013, 109: 530-537.
- [7] 胡志鹏, 黄真. 含有相变材料的通风墙板热工性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(2): 88-91.
HU Zhipeng, HUANG Zhen. Study on thermal performance of ventilated wall panel containing phase change material [J]. New Building Materials, 2019, 46 (2): 88-91.
- [8] 刘江, 杨柳, 刘衍. 西安办公建筑相变蓄热通风技术的季节适宜性研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 150-159.
LIU Jiang, YANG Liu, LIU Yan. Study on seasonal suitability of phase change heat storage coupled with night ventilation in an office building in Xi'an [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41 (1): 150-159.
- [9] 谢静超, 汤逸羚, 张召锋. 通风与相变耦合条件下围护结构最佳蓄热性能[J]. 化工学报, 2017 (7): 2684-2695.
XIE Jingchao, TANG Yiling, ZHANG Zhaofeng. Optimum heat storage performance of building envelope under coupling condition of ventilation and phase change [J]. CIESC Journal, 2017(7): 2684-2695.
- [10] 张磊, 杨柳, 张璞. 高校宿舍楼夜间蓄热通风性能实验研究[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2014, 46(5): 749-753.
ZHANG Lei, YANG Liu, ZHANG Pu. Experiment research on the regenerative night ventilation performance of university dormitory [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(5): 749-753.
- [11] MOHIT Prabhakar, MOHAMMAD Saffari, ALVARO de Gracia, et al. Improving the energy efficiency of passive PCM system using controlled natural ventilation [J]. Energy and Buildings, 2020, 228: 1-9.
- [12] ABDELAZIZ Mechouet, EL MOSTAFA Oualim, TAOUFIQ Mouhib. Effect of mechanical ventilation on the improvement of the thermal performance of PCM-incorpo-

- rated double external walls; A numerical investigation under different climatic conditions in Morocco[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 38: 1-16.
- [13] ZHU N, HU P F, XU L H. A simplified dynamic model of double layers shape-stabilized phase change materials wallboards[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 67: 508-516.
- [14] 邵必林, 杜星璇, 任秦龙. 夏热冬冷地区相变储能屋面节能效益的 LBM 数值模拟[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(3): 130-135.
- SHAO Bilin, DU Xingxuan, REN Qinlong. A LBM numerical study of the energy saving benefit of roof coupled with phase change material in hot summer and cold winter areas[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(3): 130-135.
- [15] 陆耀庆. 实用空调供热设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [16] 雷宇, 朱娜, 彭波, 等. 武汉市某办公楼地源热泵-相变蓄冷系统的优化配置[J]. *流体机械*, 2015, 43(2): 75-80.
- LEI Yu, ZHU Na, PENG Bo, et al. Optimal design of ground source heat pump system integrated with phase change cooling storage tank in an office building[J]. *Fluid Machinery*, 2015, 43(2): 75-80.
- [17] YU Jinghua, YANG Qingchen, YE Hong, et al. Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2538-2549.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 909 页)

- [12] 王登甲, 杨黎黎, 马超. 太阳能直接受益外窗热平衡关系优化分析[J]. *节能技术*, 2016, 34(1): 21-24.
- WANG Dengjia, YANG Lili, MA Chao. Optimization analysis on the heat balance relationship of direct - gain window in solar houses [J]. *Energy Conservation Technology*, 2016, 34(1): 21-24.
- [13] 余庄, 李晶, 张辉. 气候适应性窗对室内环境的影响研究[J]. *建筑科学*, 2010(8): 21-25, 42.
- YU Zhuang, LI Jing, ZHANG Hui. Study on influences of climatic adaptive window on indoor thermal environment[J]. *Building Science*, 2010(8): 21-25, 42.
- [14] 戎向阳, 钱方, 司鹏飞, 等. 一种组合式被动太阳能围护结构: CN209482528U[P]. 2019-01-11.
- RONG Xiangyang, QIAN Fang, SI Pengfei, et al. The utility model relates to a combined passive solar energy envelope: CN209482528U[P]. 2019-01-11.
- [15] 石利军, 戎向阳, 司鹏飞, 等. 高原被动式太阳能建筑透明围护结构的阶跃传热特性[J]. *暖通空调*, 2019, 49(2): 63, 107-110.
- SHI Lijun, RONG Xiangyang, SI Pengfei, et al. Leap heat-transfer characteristics for transparent envelope of passive solar buildings in alpine region [J]. *Heating, Ventilating & Air Conditioning*, 2019, 49(2): 63, 107-110.
- [16] TAN Y, PENG J, CURCIJA D C, et al. Parametric study of the impact of window attachments on air conditioning energy consumption[J]. *Solar Energy*, 2020, 202: 136-143.
- [17] 广东省建筑科学研究院. 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程: JGJT151-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 58-59.
- Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co. Ltd. Calculation specification for thermal performance of windows, doors and glass curtain-walls: JGJT151-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 58-59.
- [18] 建筑外窗传热系数检测报告[R]. 成都: 四川省建筑工程质量检测中心有限公司, 2020: 1-2.
- Test report on heat transfer coefficient of building window [R]. Chengdu: Sichuan Construction Engineering Quality Checking & Measuring Centre, 2020: 1-2.

(编辑 吴海西 沈 波)