

太阳能相变蓄热系统在温室加温中的应用

闫彦涛¹ 邹志荣^{1*} 李凯²

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为充分利用太阳能资源提高冬季温室的夜间气温,设计一种太阳能相变蓄热系统。白天利用太阳能集热板吸收太阳辐射并将其转化成热能储存到相变材料内;夜间以空气为热媒将相变材料内的热能输送到温室内,为温室加温。试验结果表明:晴天应用该系统,温室夜间平均气温可提高 2.0 °C,夜间最低气温提高 3.1 °C;在不同天气状况的综合条件下应用该系统,温室夜间最低气温平均提高 2.5 °C,20 cm 处地温平均提高 1.5 °C;经计算,晴天条件下,该系统的平均集热效率为 59.2%,夜间单位面积放热量为 4.05 MJ/m²,平均加温热流密度为 83.4 W/m²;应用该系统温室增温效果明显。

关键词 太阳能;相变材料;蓄热;温室

中图分类号 S 625.1

文章编号 1007-4333(2016)05-0139-08

文献标志码 A

Application of solar-phase change heat storage system in greenhouse

YAN Yan-tao¹, ZOU Zhi-rong^{1*}, LI Kai²

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract To make full use of solar energy resource to improve the greenhouse's temperature at night in winter, a solar-phase change heat storage system is proposed. The system uses solar panel to absorb solar radiation during the day and convert it into heat energy and then stored into phase change material. At night, the heat stored in the phase change material is transferred to the greenhouse use air for greenhouse heating. The results show that: In sunny days, the greenhouse's average temperature at night (18:00 – 8:00) is increased by 2.0 °C and the minimum temperature at night increased by 3.1 °C; Under different weather conditions, the greenhouse's average minimum temperature is increased by 2.5 °C at night, the underground soil's temperature at 20 cm depth in the average is increased by 1.5 °C; Through calculation, in sunny days, the system's average radiation collecting efficiency reached 59.2%, the heat release quantity at night is 4.05 MJ/m² and the average warming heat flux density is 83.4 W/m². The research has proved that the system's energy conservation effect and heating effect for greenhouse is obvious.

Keywords solar energy; phase change material; heat storage; greenhouse

传统温室加温方式存在耗能大^[1]、环境污染严重^[2-3]等诸多弊端,研究新的储能加热方式,特别是高效储存利用太阳能前景广阔。近年来,相变储能在建筑科学与能源科学领域的应用研究发展迅速,将该技术用于温室节能意义重大。相变储能利用相变材料(Phase change material, PCM)物态变化过

程中吸收或放出的热量进行能量的储存或释放,实现能量在时间和空间上的转移。传统储能方式一般为显热储能,利用水^[4-5]、土壤^[6-7]和石砾^[8]等作为储能材料进行能量储存。相变材料与显热储能材料相比,有储能密度高、相变温度选择范围较宽,温度易控制,蓄放热过程温度变化小,用量少等优点。相

收稿日期: 2015-05-07

基金项目: 国家“863”计划项目(2013AA102407)

第一作者: 闫彦涛, 硕士研究生, E-mail: yantao9003@163.com

通讯作者: 邹志荣, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业研究, E-mail: zouzhirong2005@163.com

变储能被认为是最有潜力的储能方式^[9-10]。国内外相关研究中,相变材料在温室上的应用可以分为2类:

一类是相变材料将白天进入温室内的一部分太阳能以潜热的形式储存起来,夜间温室气温降低时再将其释放到温室内,为温室加温。这种方式中相变材料的利用形式主要有相变砌块^[9,11]、相变砂浆^[12]、相变墙板^[13-14]和相变蓄热器^[15-16]等。相变材料的这种利用方式一定程度上对温室内的温度调节起到了“削峰填谷”的作用,但由于白天进入温室内部的太阳能有限,其夜间加温能力也有限。

另一类是相变材料储存温室外的太阳能,夜间将其释放到温室内。这种方式一般在温室外设太阳能收集装置,另需相变材料储存装置和热能传输装置。这种方式将温室外的热能输送到温室内,可根据温室的需热量为温室补充热量,应用灵活。但大多研究^[17-19]将太阳能接收装置和相变材料储能装置分开,蓄热效率较低。国内研究^[20-22]大多集中在建筑供暖方面,用于温室加热的较少。李志永等^[20]研制了太阳能-相变蓄热-新风供暖系统,通过系统的运行,达到将太阳能作为稳定热源为建筑供暖的目的。刘程^[21]对太阳能-相变水箱蓄热系统进行研究并应用,证明了利用该相变蓄热系统为普通家庭提供生活热水的可行性。国外在温室加温中的研究较多,但都是针对玻璃温室。Kern等^[17]用 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为相变材料,制作相变蓄热器,与太阳能空气集热器相连,组成相变蓄热系统,为温室加温,该系统的储能效率达38%~43%。Benli等^[19]研制了太阳能相变蓄热系统,为温室加温,温室内温度提高了6~9℃。

由于日光温室与玻璃温室存在差异,本研究拟以相变材料为蓄热介质,空气为传热工质,设计一种太阳能相变蓄热系统,并结合日光温室对该系统在实际应用中的换热性能及加温效果进行测试,旨在为相变储能技术在日光温室蓄热加温领域的应用提供理论和数据支持。

1 太阳能相变蓄热系统

1.1 系统结构及组成

本研究中太阳能相变蓄热系统(图1)由太阳能相变蓄热器(图2)、PVC管、风机、控制器、阀门等组成。

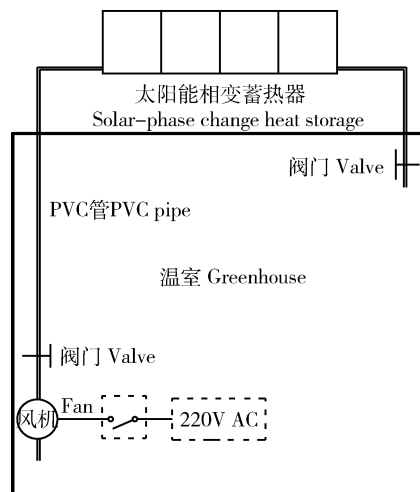
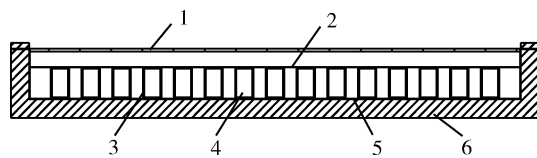


图1 太阳能相变蓄热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the solar-phase change heat storage system



1. 透明盖板 Transparent cover plate; 2. 太阳能集热板 Solar panel; 3. 蓄热单元 Heat storage unit; 4. 相变材料 Phase change material; 5. 钢骨架 Steel frame; 6. 保温材料 Thermal insulation material

图2 太阳能相变蓄热器剖面图

Fig. 2 Sectional view of solar-phase change heat storage

太阳能相变蓄热器钢骨架用薄钢板折焊而成,钢板外部粘贴橡塑海绵保温材料,钢板内部放置蓄热单元体,蓄热单元体上覆盖镀有选择性吸收涂层的太阳能集热板,最上方放置具有透光和保温功能的PC阳光板(具有中空结构)。蓄热单元体由方钢制成,内部填充相变材料;蓄热单元之间的空隙作为加热空气的流道。

该蓄热器采光面积为 $1\,200\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,钢骨架为 $1\,300\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),透明盖板为 $1\,300\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),蓄热单元体尺寸为 $50\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$,保温材料厚30 mm。相变材料配方为 $20.0\text{ g Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 中加入 1.0 g 活性 Al_2O_3 和 1.0 g CMC(羧甲基纤维素钠),该配方经差示扫描量热仪(DSC)测定,其潜热值为 214.5 J/g ,熔点 $34.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。用步冷曲线法经600次循环后,材料

无明显过冷和相分离,热性能稳定。每个蓄热器内相变材料封装量为 35 kg。

试验用 4 块太阳能相变蓄热器串联起来使用,太阳能相变蓄热器置于日光温室外部后墙上,朝向正南,与水平面呈 50° 角放置。太阳能相变蓄热器内部空气可以流动,蓄热器用直径 50 mm 的 PVC 管与温室连通,PVC 管穿过后屋面进入温室。温室内,PVC 管进气口设置在日光温室上部东北角,出气口设置在温室下部西南角;在 PVC 管进气口、出气口处安装空气阀门;在 PVC 管出气口安装抽风机,抽风机由温控开关控制。温室外部的 PVC 管用橡塑海绵管做保温处理。

1.2 蓄放热方式

白天,太阳能相变蓄热器进、出气口空气阀门关闭,蓄热器与温室内的空气不流通。当太阳辐射透过太阳能相变蓄热器的透明盖板照射到表面镀有选择性吸收涂层的太阳能集热板时,其能量被转换成热能,一部分储存在相变材料内,一部分散失到蓄热器外。相变材料因其在相变过程中有较大的潜热,故其能作为储能材料蓄积较多的热能。夜间,开启蓄热器进出口空气阀门,打开风机,使温室内和太阳能相变蓄热器内的空气循环。当温室内气温较低的空气流经蓄热器内温度较高的蓄热单元表面时被加热,随着空气的不断循环,蓄热器将白天蓄积的热量逐渐输送到温室内,从而维持温室内相对较高的温度。

2 试验材料与方法

2.1 试验方案

供试温室位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学园艺场内,温室坐北朝南,长 10 m,跨度 5 m,后墙结构由内而外为 240 mm 砌块、100 mm 聚苯板、120 mm 砌块。供试温室中间用 120 mm 砖墙隔开,西侧作为试验温室,东侧作为对照温室。温室内不种植作物。

在试验温室和对照温室内东西走向的中线平面上安装空气温湿度检测仪器和地温监测仪器,用于测试太阳能相变蓄热系统对温室的增温效果。在太阳能相变蓄热器透明盖板上布置 1 个太阳辐射度测点(图 3),监测太阳辐射度的变化。在太阳能相变蓄热器内正中间一个蓄热单元体(方钢)内相变材料中自上而下布置 3 个测温热电偶监测相变材料温度的变化;上部热电偶距蓄热单元体上端 10 cm、下部

热电偶距蓄热单元体下端 10 cm,中部热电偶位于蓄热单元体中部。在蓄热器内的进气口和出气口处各安装 1 个测温热电偶,用于监测蓄热器对空气的加热性能。2014-12-28—2015-02-06 对各项指标进行检测,所有数据监测仪器均为设置为 5 min 自动记录 1 次。

为减少太阳能相变蓄热器自身的散热,试验期间每天下午盖保温被后 30 min 内打开进排气口空气阀门和风机。当风机出口气温降低到 15°C 时风机自动关闭,此过程由温控开关控制。阴雪天气风机和空气阀门不开启。

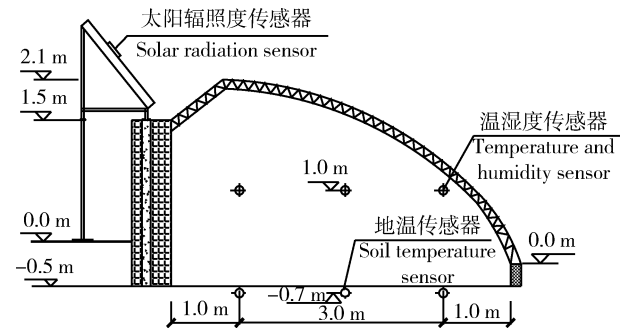


图 3 试验监测点分布图

Fig. 3 Layout of measuring points

2.2 试验仪器

空气温湿度和地温测试仪器为哈尔滨物格电子技术有限公司生产的 PDE-KI 三路长期数据记录仪,其量程为温度 $-50\sim 120^\circ\text{C}$,湿度为 $0\sim 99\%$;测量精度为温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,湿度 $\pm 3\%$ 。太阳辐射度测试仪器为北京世纪建通环境技术公司生产的 JRT09 辐射热计,辐射热量程 $0\sim 10\text{ kW/m}^2$,测量精度 $\pm 4\%$,分辨率 1 W/m^2 。测温热电偶用杭州浩龙机电设备有限公司生产的 HL2008 多点温度巡检仪,测量范围: $-50\sim 300^\circ\text{C}$,测量精度: $\pm(0.05\% + 0.02\% \text{ FS})$ 。塔峰牌风机 FR-ZK20220-R50,功率 20 W,风压 95 Pa,风量 $50\text{ m}^3/\text{h}$,进风口直径 50 mm。AVM-07 风速仪。臣源牌 WK206 温控开关,测温范围 $-9\sim 99^\circ\text{C}$,测量精度 0.1°C 。

试验所得数据用 Excel 和 Origin 软件进行分析。

2.3 试验方法

2.3.1 系统集热效果分析

集热器的集热效率是一定时段内集热器获得的有用能量与太阳能集热板吸收的太阳辐射能之比,

表征了集热器对输入能量的有效利用程度,也是评价集热器热性能的综合性指标^[23]。

$$\eta = \frac{Q_U}{Q_A} \quad (1)$$

式中: η 为集热器集热效率; Q_U 为在一定时段内集热器获得的有用能量, J ; Q_A 为在一定时段内集热板获得的太阳辐照能量, J 。

$$Q_A = AG(\tau\alpha)_e \Delta t \quad (2)$$

式中: A 为集热器采光面积, m^2 ; G 为太阳辐照度, W/m^2 ; $(\tau\alpha)_e$ 为透明盖板透射比与吸热板太阳吸收比的有效乘积; Δt 为时间段, s 。太阳能相变蓄热器集热过程中,其获得的有用能量 Q_U 即储存到相变材料内的潜热和显热,由于相变材料的显热值远小于其潜热值,故在计算时忽略其显热。

$$Q_U = m \cdot q \quad (3)$$

式中: m 为升温过程中熔化了了的相变材料的质量, g ; q 为相变材料的潜热值, J/g 。

2.3.2 系统放热效果分析

风机开启后,湿空气与蓄热器内相变材料的换热量取决于空气的质量和蓄热器进出口空气焓值的变化。其换热量 Q 为^[24]

$$Q = \sum V_i \rho_i |h_{i1} - h_{i2}| \Delta t_i \quad (4)$$

式中: Δt_i 为 i 时段, h ; V_i 为 i 时段空气体积流量, m^3/h ; ρ_i 为 i 时段空气密度, kg/m^3 ; h_{i1} 为 i 时段进口空气焓值, kJ/kg ; h_{i2} 为 i 时段出口空气焓值, kJ/kg 。湿空气焓 h 的计算式为

$$h = 1.01T + d(2500 + 1.84T) \quad (5)$$

$$d = \varphi d_b$$

式中: T 为温度, $^{\circ}C$; d 为湿空气含湿量, kg/kg ; φ 为空气相对湿度; d_b 为饱和含湿量, kJ/kg 。蓄热器的放热效率 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{Q}{Q_U} \quad (6)$$

太阳能相变蓄热系统平均加温热流量 Φ 的计算式为

$$\Phi = \frac{Q}{3600 \sum \Delta t_i} \quad (7)$$

$$q = \Phi/A \quad (8)$$

式中: q 为平均加温热流密度, kW/m^2 。

3 结果与分析

3.1 典型晴天温室内气温变化

太阳能相变蓄热系统对温室气温影响最为直

接,故分析典型晴天该系统对温室内气温的影响。图4为2014-12-29 T8:00—2014-12-31 T8:00温室内气温变化曲线。白天风机和空气进出口阀门关闭,试验温室和对照温室白天气温变化趋势基本相同。16:30盖上保温被后,风机开启,试验温室气温下降速度明显较对照温室气温缓慢。这是由于风机开启,空气在蓄热器和温室之间循环,温室内温度较低的空气在蓄热器内被加热后输送到温室内,热空气在温室内散热后温度降低,温度较低的空气再经蓄热器进气口进入太阳能相变蓄热器被加热,如此不断循环,蓄热器内白天储存的热量不断输入温室内,为温室加温。太阳能相变蓄热器补充的热量不足以完全弥补温室向外的散热,故试验温室气温仍逐渐下降。随着加温时间的积累,太阳能相变蓄热系统向温室输送的热能逐渐增多,试验温室和对照温室的气温差逐渐增大,这有利于提高温室夜间的最低气温,避免冷害。对试验期间(18:00—次日8:00)的气温数据进行分析,其平均气温分别为16.7和18.0 $^{\circ}C$,分别高于对照温室2.0和2.1 $^{\circ}C$ 。29日和30日的夜间最低气温分别为11.9和13.4 $^{\circ}C$,分别高于对照温室3.1和3.0 $^{\circ}C$ 。

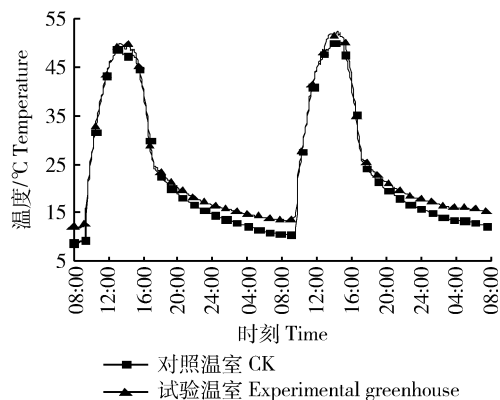


图4 典型晴天温室内气温变化

Fig. 4 The air temperature inside greenhouses on a typical sunny day

3.2 试验期间不同天气状况下温室内夜间气温变化

图5示出2014-12-28—2015-02-06温室内夜间(18:00—次日8:00)平均气温和日最低气温。其中2015年1月24、25、27、28、30、31日,2月1、2日为阴雪天气,系统风机不开启,其余时间每天开启。可见,试验温室每日夜间平均气温和日最低气温显著高于对照温室,由于该系统将温室外的热能补充到

试验温室内,故试验温室气温较高。由图 5 可知,该系统工作期间试验温室与对照温室的气温差明显大于该系统不工作时(阴雪天气)试验温室与对照温室的气温差,这是由于系统工作期间试验温室夜间有系统供热和自身的土壤和墙体供热两部分,对照温室夜间只有自身的土壤和墙体供热,故温差较大;系统不工作时,试验温室夜间只有自身的土壤和墙体供热,与对照温室的温差较小。由图 5 可知,阴雪天

气试验温室夜间平均气温和日最低气温仍高于对照温室,这是由于温室有一定的蓄热能力,晴天时试验温室较对照温室蓄热多,故短期阴雪天试验温室内气温较高,可见该系统对短期的阴雪天气也有一定的增温效果。对试验阶段气温数据进行整理分析,2014-12-28—2015-02-06 试验温室夜间平均气温和日最低气温平均为 12.4 和 9.7 °C,分别比对照温室高 1.8 和 2.5 °C。

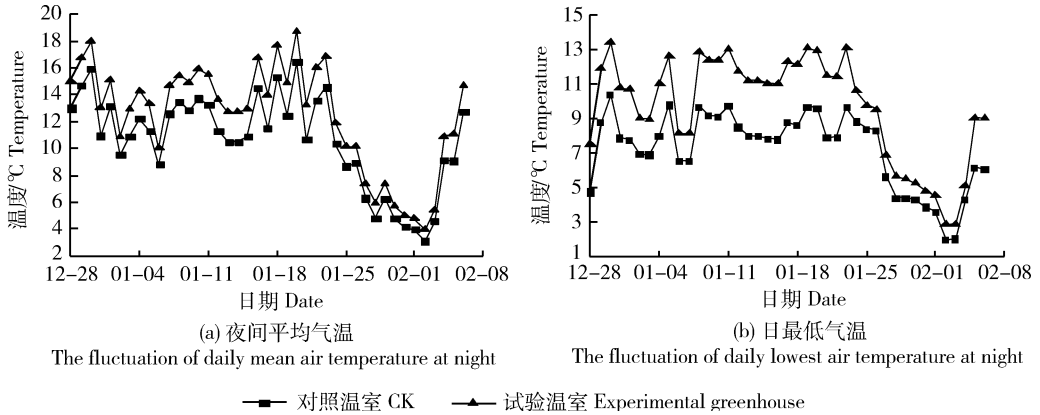


图 5 试验期间温室内气温变化

Fig. 5 The change of air temperature inside of greenhouses

3.3 试验期间不同天气状况下温室内地温的变化

2014-12-28—2015-02-06 试验温室和对照温室地表下 20 cm 处的日平均地温和日最低地温见图 6。试验温室的日平均地温和日最低地温明显高于对照温室的日平均地温和日最低地温,这是由于太阳能相变蓄热系统向温室输出的热量一部分蓄积到了土壤内,使土壤增温;与图 5 对比可知,随天气状况的变化,地温变化较气温变化平缓,是由于土壤的比热容较空气的大,蓄热能力较强。对日平均地

温和日最低地温数据进行分析,随连续晴天天数的增加,试验温室与对照温室的日平均地温温差和日最低地温温差逐渐增大;随连续阴雪天气天数的增加,此二者的温差逐渐减小。这是由于晴天夜间系统为温室加温,一部分热量蓄积到土壤内,随着连续晴天天数的增加,土壤内蓄热逐渐增多,故试验温室与对照温室土壤温差逐渐增大;阴雪天,土壤向外散热,随着连续阴天天数的增加,试验温室与对照温室的温差逐渐减小。此显示出该系统对温室具有一定

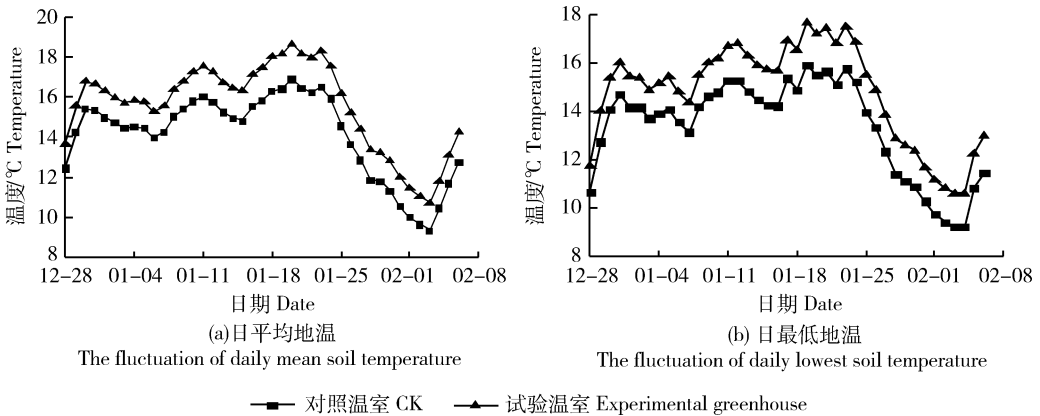


图 6 试验期间温室内地温变化

Fig. 6 The change of soil temperature inside of greenhouses

的中长期蓄热能力。对试验期间地温数据进行整理,试验期间试验温室的日平均地温和日最低地温平均为 15.6 和 14.8 °C,分别比对照温室高 1.5 和 1.4 °C。

3.4 试验期间不同天气状况下温室内平均空气相对湿度变化

2014-12-28—2015-02-06 温室内平均空气相对湿度见图 7。温室内的相对空气湿度受温室内的气温影响较大,温室内空气相对湿度每天有明显的变化,试验温室内平均空气相对湿度明显低于对照温室内平均空气相对湿度;太阳能相变蓄热系统工作期间,试验温室与对照温室内的空气相对湿度差明显大于该系统不工作时(阴雪天气)两温室的相对空气湿度差。这是由于蓄热系统工作期间太阳能相变蓄热器对温室加热,试验温室气温增加,进而使试验温室内空气相对湿度降低;系统工作期间试验温室与对照温室之间温差大,受温度影响,故空气相对湿度差也较大。经计算,在试验阶段内,试验温室内日平均空气相对湿度为 77.4%,平均比对照温室低 4.0%。

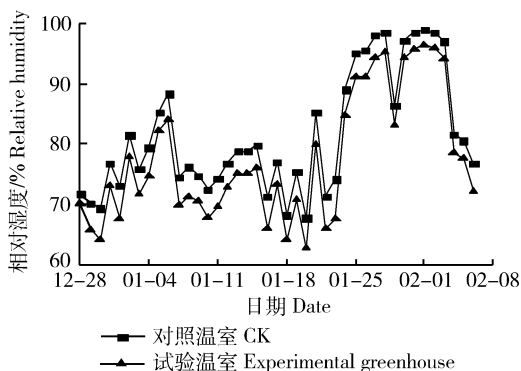


图 7 温室内日平均空气相对湿度

Fig. 7 The fluctuation of daily mean relative humidity inside of greenhouses

3.5 典型晴天太阳能相变蓄热系统集放热效率分析

3.5.1 太阳能集热效率估算

根据试验监测数据,典型晴天(2014-12-30)日照时间 9:00—16:30,平均太阳辐照度为 451 W/m²。以相变材料的温度是否高于其熔点温度作为相变材料是否熔化的依据,通过对蓄热单元体内不同部位相变材料温度的分析,蓄热器内约有 70% 的相变材料完全熔化。PC 阳光板透光率为 0.8,太阳能集热板太阳吸收比为 0.95。根据式(1)~(3),集热器的

平均集热效率为 59.2%。根据叶宏^[25]的研究,普通平板太阳能空气集热器的平均集热效率为 40.0%,可见太阳能相变蓄热器可有效地提高集热效率。由于空气集热器的集热效率随集热温度升高而降低,相变材料在熔点附近较大的潜热降低了集热温度,故太阳能相变蓄热器的集热效率较普通空气集热器高。

3.5.2 相变蓄热器放热效率估算

根据试验监测数据,风机开启时间(2014-12-30) 16:50—次日 6:20。实测管道内通风量为 47.9 m³/h。蓄热器放热过程进气口空气平均温度为 16.0 °C,平均空气相对湿度为 90%;出气口空气平均气温为 28.9 °C。该过程空气含湿量近似不变,出气口空气相对湿度约为 0.49,根据式(4)~(6),估算出蓄热器与空气换热量为 15 560.1 kJ,进出口空气焓值增加 19.21 kJ/kg,蓄热器放热效率为 74.0%。蓄热器单位面积放热量为 4.05 MJ/m²。根据式(7)、(8),太阳能相变蓄热系统平均加温热流量为 0.32 kW,平均加温热流密度为 83.4 W/m²。系统向温室输送的热量与风机消耗的电能之比为 16:1,可见,系统向温室输送的热量远大于消耗的电能,晴天条件下,节能效果明显。

4 结论与讨论

1)该太阳能相变蓄热系统对试验温室的增温效果明显。晴天条件下,可使日光温室夜间气温平均提高 2.0 °C,夜间最低气温提高 3.1 °C;综合不同天气状况,该系统能使温室夜间最低气温提高 2.5 °C,20 cm 处地温提高 1.5 °C,空气相对湿度降低 4.0%。

2)在冬季晴天状况下,根据本试验的条件,该系统白天的平均集热效率达 59%,有良好的集热性能;夜间,该系统单位面积放热量为 4.05 MJ/m²,平均加温热流密度达 83 W/m²,有良好的加温性能。

太阳能相变蓄热系统白天蓄积清洁易得的太阳能,夜间为温室补充热量,为冬季日光温室加温提供了新方法。该系统应用时可根据温室所需的加热量选择相应面积的蓄热器,应用灵活;该系统集热/蓄热装置一体化,装置精简,蓄热效率较高;本系统放热时以空气为传热工质,可直接加热温室内的空气,使用方便。但由于对太阳能相变蓄热系统的研究尚处于初步阶段,存在初期投资较大,不能长期连阴天

应用等弊端,需进一步改进和完善。

参 考 文 献

- [1] 崔庆法,王静.连栋温室可移动式双层内保温幕保温节能效果初探[J].农业工程学报,2002,18(4):86-89
Wang J, Cui Q F, Lin M Z. Illumination environment of different structural solar greenhouse and their supplement illumination [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4): 86-89 (in Chinese)
- [2] 郭世荣,孙锦,束胜,李晶.国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J].南京农业大学学报,2012,35(5):43-52
Guo S R, Sun J, Shu S, Li J. General situation, charactics and trends of protected horticulture in foreigners [J]. *Journal of Nanjing Agriculture University*, 2012, 35 (5): 43-52 (in Chinese)
- [3] 李萍萍,毛罕平.我国温室生产的现状与亟待研究的技术问题探讨[J].农业机械学报,1996,27(3):136-140
Li P P, Mao H P. The general situation and technique developing approaches of greenhouse in China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1996, 27 (3): 135-140 (in Chinese)
- [4] 马承伟,黄之栋,穆丽君.连栋温室地中热交换系统贮热加温的试验[J].农业工程学报,1999,15(2):160-164
Ma C W, Huang Z D, Mu L J. Experiment of heating & heating-storing of the underground heat exchange system in a multi-span greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15 (2): 160-164 (in Chinese)
- [5] 王永维,苗香雯,崔绍荣,梁喜凤.温室地下蓄热系统换热特性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):248-251
Wang Y W, Miao X W, Cui S R, Liang X F. Heat exchanging characteristics of underground heat storage system in greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(6): 248-251 (in Chinese)
- [6] 王顺生,马承伟,柴力龙,孔云.日光温室内置式太阳能集热调温装置试验研究[J].农机化研究,2007(2):130-133
Wang S S, Ma C W, Chai L L, Kong Y. Equipment in sunlight greenhouse for collecting heat and adjusting temperature [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007 (2): 130-133 (in Chinese)
- [7] 方慧,杨其长,张义.基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热装置试验[J].农业工程学报,2012,28(20):210-216
Fang H, Yang Q C, Zhang Y. Experimental study on shallow soil assisted heat release-storage system with water-water heat pump in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (20): 210-216 (in Chinese)
- [8] 张峰,张林华,刘文波,董瑞.带地下卵石床蓄热装置的日光温室增温实验研究[J].可再生能源,2009,27(6):7-9
Zhang F, Zhang L H, Liu W B, Dong R. Experimental study on temperature with underground pebble increasing in solar greenhouse bed thermal storage [J]. *Renewable Energy*, 2009, 27(6): 7-9 (in Chinese)
- [9] 张勇,邹志荣,李建明,胡晓辉.日光温室相变空心砌块的制备及功效[J].农业工程学报,2010,26(2):263-267
Zhang Y, Zou Z R, Li J M, Hu X H. Preparation of the small concrete hollow block with PCM and its efficacy in greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 263-267 (in Chinese)
- [10] 王宏丽,邹志荣,陈红武,张勇.温室中应用相变储热技术研究进展[J].农业工程学报,2008,24(6):304-307
Wang H L, Zou Z R, Chen H W, Zhang Y. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 304-307 (in Chinese)
- [11] 王宏丽,李晓野,邹志荣.相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J].农业工程学报,2011,27(5):253-257
Wang H L, Li X Y, Zou Z R. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (5): 253-257 (in Chinese)
- [12] 陈超,果海凤,周玮.相变墙体材料在温室大棚中的实验研究[J].太阳能学报,2009,30(3):287-293
Chen C, Guo H F, Zhou W. Experimental research of the composite phase change material in greenhouse [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2009, 30(3): 287-293 (in Chinese)
- [13] 管勇,陈超,李琢,韩云全,凌浩恕.相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J].农业工程学报,2012,28(10):194-201
Guan Y, Chen C, Li Z, Han Y Q, Ling H S. Improving thermal environment in solar greenhouse with phase-change thermal storage wall [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(10): 194-201 (in Chinese)
- [14] 杨小龙,王宏丽,许红军,韩丽蓉.磷酸氢二钠相变墙板在温室中的应用效果[J].上海交通大学学报:农业科学版,2014,32(4):88-94
Yang X L, Wang H L, Xu H J, Han L R. Performance of phase change material storage wallboard of disodium hydrogen phosphate dodecahydrate in solar greenhouse [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agriculture Science*, 2014, 32 (4): 88-94 (in Chinese)
- [15] Huang B K, Toksoy M, Cengel Y A. Transient response of latent heat storage in greenhouse solar system [J]. *Solar Energy*, 1986, 37(4): 279-292
- [16] Boulard T, Razafinjohany E, Baille A, Jaffrin A, Fabre B. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 52: 303-318
- [17] Alkilani M M, Sopian K, Alghoul M A, Sohif M, Ruslan M H. Review of solar air collectors with thermal storage units [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 1476-

- 1490
- [18] Ozturk H H. Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46: 1523-1542
- [19] Benli H, Durmus A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating[J]. *Solar Energy*, 2009, 83: 2109-2119
- [20] 李志永, 陈超, 张叶, 李青青, 罗海亮, 邓超. 太阳能-相变蓄热-新风供暖系统仿真优化设计研究[J]. *太阳能学报*, 2012, 43(5): 852-859
- Li Z Y, Chen C, Zhang Y, Li Q Q, Luo H L, Deng C. Simulation optimization research on solar energy-phase change thermal storage-fresh air heating system[J]. *ACTA Energiæ Solaris Sinica*, 2012, 43(5): 852-859 (in Chinese)
- [21] Liu C, Yuan Y P, Zhang N, Cao X L, Yang X J. A novel PCM of lauric-myristic-stearic acid/expanded graphite composite for thermal energy storage[J]. *Materials Letters*, 2014, 120: 43-46
- [22] 胡凌霄. 太阳能热水系统中相变蓄热模拟与设计[D]. 上海: 东华大学, 2010
- Hu L X. Simulative study on the heat storage performance and design of the solar hot water system[D]. Shanghai: Donghua University, 2010 (in Chinese)
- [23] 郭春杰. 太阳能空气集热器热性能的实验和模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013
- Guo C J. Experimental and simulation study on thermal performance of the air solar collector [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013 (in Chinese)
- [24] 徐昶昕. 农业生物环境控制[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 10-12, 52, 187
- Xu C X. *Control of Biological Environment in Agriculture* [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1994: 10-12, 52, 187 (in Chinese)
- [25] 叶宏, 葛新石, 庄双勇. 带透明蜂窝的太阳空气加热器的实验研究(I): 不同结构空气加热器的性能比较[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(1): 27-31
- Ye H, Ge X S, Zhuang S Y. Experimental investigation on solar air heaters with honeycomb panel (I): Thermal performance comparison of solar air heaters of different constructions[J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 2003, 24(1): 27-31 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春