

# 日光温室金属膜集放热装置增温效果的性能测试

方 慧, 张 义\*, 杨其长, 卢 威, 周 波, 周 升

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;  
2. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 日光温室冬季夜间温度较低, 为满足作物能正常生长往往需要加温装置, 为此, 该课题组设计了一种双黑膜主动集放热装置, 该装置白天以热辐射和热对流的模式吸收太阳辐射热和温室内空气中的热量, 夜间通过热对流的模式将热量释放到温室中, 以增加温室夜间温度。通过冬季加温试验发现该装置对太阳辐射的吸收率偏低, 为进一步提升该装置的集放热性能, 该文对原有双黑膜集放热装置进行了改进, 用金属膜替换原有双黑膜吸热面, 试验结果表明: 运行金属膜集放热装置能将温室夜间最低温度提高 2.4℃, 装置的集热效率为 83%, 热量的有效利用率为 68%; 与电加热加温方式相比节能量为 110 MJ, 节能 72.6%, 节能效果显著; 金属膜集放热装置对太阳辐射的吸收系数为 0.81, 比双黑膜集放热装置提高了 0.22; 白天温室自然通风条件下, 装置与空气间的对流换热系数为 14.6 W/(m<sup>2</sup>·℃), 比双黑膜蓄放热装置高 6.3 W/(m<sup>2</sup>·℃)。

**关键词:** 温室; 加热设备; 蓄热; 节能; 放热; 日光温室

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.024

中图分类号: S625.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0177-06

方 慧, 张 义, 杨其长, 卢 威, 周 波, 周 升. 日光温室金属膜集放热装置增温效果的性能测试[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 177-182. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.024 http://www.tcsae.org  
Fang Hui, Zhang Yi, Yang Qichang, Lu Wei, Zhou Bo, Zhou Sheng. Performance testing on warming effect of heat storage-release metal film in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 177-182. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.024 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

日光温室是中国一种特有的温室结构形式, 温室三面为实体围护结构, 单面为透光覆盖材料, 由于其高直射光透光率与高保温性能在中国北方地区得到了大面积的推广应用<sup>[1-3]</sup>。日光温室的主要特点是具有北墙, 作为重要的围护结构北墙在发挥承重作用的同时更是维持温室内适宜温度环境的良好保温蓄热体。白天, 墙体表面通过接收透过前屋面照射进来的太阳辐射进行热量蓄积, 夜晚, 墙体蓄积的热量因墙体表面与室内空气的温度差而不断向室内释放。笔者开展的山东、北京地区日光温室墙体集放热量的试验测试表明: 墙体在夜间向室内释放的热量是有限的, 热量释放值在前半夜较大, 后半夜较小, 与此同时, 室内空气在后半夜进入低温阶段, 作物冷害多发生在此时段<sup>[4]</sup>。为提高凌晨时段室内的温度, 各地农户多采用增加墙体厚度以提高墙体在夜间的

放热量<sup>[4-8]</sup>, 但是效果不十分理想, 并且存在土地资源浪费的问题。目前已有学者开始研究适用于日光温室的加温方式, 如地中换热<sup>[9]</sup>、太阳能板集热<sup>[10-12]</sup>、相变蓄热<sup>[13-17]</sup>, 毛细管换热<sup>[18]</sup>, 但由于温室增温效果有限且投资成本较大, 在实际推广应用受到限制。

为此, 本课题组提出了一种以流体为介质的主动集放热方法, 白天利用循环的流体介质将到达墙体表面的太阳辐射能吸收并蓄积起来, 夜晚再通过流体的循环流动释放热量, 将日光温室墙体能量被动蓄积方式转为主动。白天尽可能多的蓄积太阳辐射热量并将这部分热量转移储存起来, 夜间当温室内温度较低时再将这部分热量释放出来, 以提高温室夜间环境温度。基于此方法, 课题组前期设计了 2 种集放热装置, 透光水幕帘集放热装置<sup>[19]</sup>和双黑膜水幕帘集放热装置<sup>[20]</sup>, 2 种集放热装置的试验测试结果表明, 增温效果显著。但这 2 种集放热装置也存在弊端, 如透光膜与黑膜为软质材料, 在温室生产中易破损, 且 2 种软质材料对光的吸收率偏低<sup>[21]</sup>。针对此问题, 本文设计了一种以金属膜为吸热材料的集放热装置, 并通过冬季试验测试了该装置的加温效果及装置的性能参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验系统及工作原理

金属膜主动集放热装置由金属膜集放热器、蓄热水池、水泵和循环管路组成。金属膜集放热器的吸热层为 0.1 cm 厚的铝箔, 保温层为 2 cm 厚的橡塑板, 铝箔与橡

收稿日期: 2015-02-12 修订日期: 2015-07-08

基金项目: 863 计划 (2013AA102407); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203002)

作者简介: 方 慧, 女, 助研, 主要从事设施农业环境工程方面的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。

Email: fanghui@caas.cn

※通信作者: 张 义, 女, 博士, 助研, 主要从事设施园艺环境工程研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。

Email: zhangyi03@caas.cn

塑板间距 0.2 cm, 为提高集放热器对太阳辐射的吸收率, 铝箔表面喷涂成亚黑色。温室共安装 19 个集放热单元, 每块集放热单元的高度是 1.5 m, 宽度是 1.24 m, 总有效集放热面积为 35.34 m<sup>2</sup>。蓄热水池的体积为 4 m<sup>3</sup>。水泵额定流量 8 m<sup>3</sup>/h, 功率 750 W。

金属膜集放热器安装于日光温室后墙内表面, 后墙覆盖率为 37.2%, 布置见图 1。白天揭开保温被的同时开

启集放热装置 (见表 1 中蓄热时间段), 金属膜集放热器的吸热层开始吸收太阳辐射热, 铝箔温度升高, 同时吸热层与保温层之间的吸热介质水通过循环吸收铝箔的热量, 并将热量储存于水池中; 夜间当温室内空气温度较低时, 开启循环水泵 (见表 1 中加热时间段), 通过金属膜集放热器将蓄热水池中的热量释放到温室中。集放热装置原理图参考文献<sup>[20]</sup>。

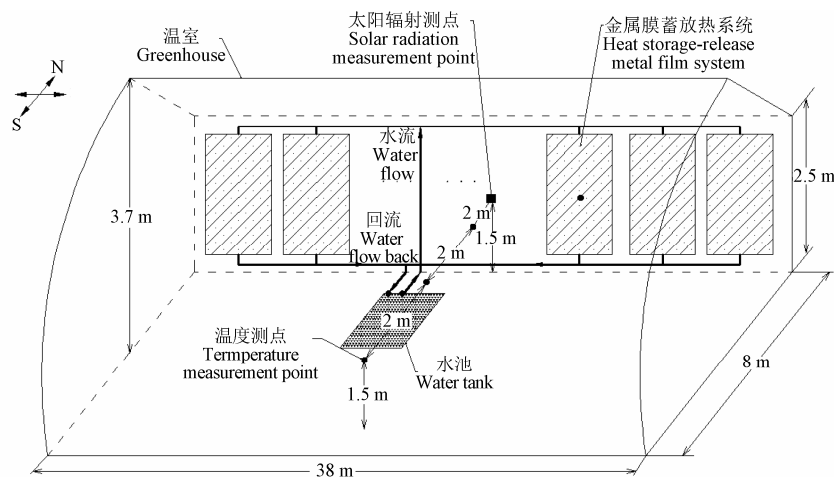


图 1 试验温室测点布置图

Fig.1 Schematic diagram of measurement points in experimental greenhouse

## 1.2 试验设计

### 1.2.1 试验温室及测点布置

试验日光温室位于北京市昌平区小汤山现代农业科技示范园西区 (39°54'N, 116°24'E), 温室为东西走向, 长 38 m, 跨度 8 m, 后墙高 2.5 m, 脊高 3.7 m, 后坡长 1.5 m, 采用钢骨架结构, 前坡覆盖材料为单层 0.08 mm PVC 塑料薄膜, 温室外覆盖 3 cm 厚自防水保温被, 后墙内侧为 12 cm 厚红砖墙, 外侧为 24 cm 厚红砖墙, 中间为 10 cm 厚聚苯板, 后坡内侧为 10 cm 厚预制板, 外侧为 10 cm 厚聚苯板。对照温室结构、材料和建造时间均与试验温室相同。两温室南北方向间距 28 m。试验温室主要用于番茄育苗, 对照温室种植草莓, 温室结构及测点布置如图 1。

空气温度测点布置: 在试验温室与对照温室跨中距北墙 2、4、6 m 处分别设置 3 个温度测点, 测点均距地面 1.5 m。金属膜集放热器温度测点布置: 在集放热板的外表面和中间水流层各设置 1 个温度测点, 同时在试验温室集放热板外表面平行于后墙设置 1 个太阳辐射测点, 3 个测点均距东墙 19 m, 距地面 1.5 m。蓄水池水温测点设置: 在水池的进水口、出水口和水池几何中心设置 3 个温度测点。

### 1.2.2 试验仪器

太阳辐射测试选用美国坎贝尔公司生产的 CMP3 型太阳辐射传感器, 精确度为 0.5%, 测量范围为 0~2 000 W/m<sup>2</sup>。温度测试选用中国计量院生产的铜-康铜热电偶, 测量精度为 ±0.2℃。数据采集仪选用美国坎贝尔公司生产的 CR1000, 用于自动记录热电偶采集的温度值和辐射传感器采集的太阳辐射值, 所测数据采集间隔 10 min。

### 1.2.3 试验设置

试验时间为 2012 年 12 月 1 日—2012 年 12 月 30 日。日光温室金属膜集放热装置运行控制模式: 集蓄热阶段, 日光温室保温被开启即开始集热, 保温被覆盖时关闭; 放热阶段, 当温室内气温低于 10℃时, 系统开启。试验期间蓄水池实测蓄水量为 3.1 m<sup>3</sup>。选取 2012 年 12 月 22 日—25 日的典型室外气象条件下的测试数据进行分析, 测试期间, 温室蓄/放热时间段和天气状况如表 1。

表 1 系统运行参数  
Table 1 Operation parameter

时间 Time	蓄热时间段 Heat storage period ( $t_{c,start}$ ~ $t_{c,end}$ )	加热时间段 Heating period( $t_{r,start}$ ~ $t_{r,end}$ )	天气 Weather
2012-12-22 09:00~ 2012-12-23 09:00	09:00~15:50	00:00~08:20	晴
2012-12-23 09:00~ 2012-12-24 09:00	09:00~16:10	00:20~08:30	晴
2012-12-24 09:00~ 2012-12-25 09:00	09:30~15:50	00:00~08:30	阴

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 金属膜集放热装置性能测试

金属膜集放热装置白天蓄积的热量和夜间释放的热量可通过下式计算:

$$Q_{c,\tau} = \rho_w \cdot v_w \cdot C_w (\bar{T}_{o,\tau} - \bar{T}_{i,\tau}) \quad (1)$$

$$E_c = \sum_{t_{c,start}}^{t_{c,end}} Q_{c,\tau} \cdot \tau \quad (2)$$

$$Q_{r,\tau} = \rho_w \cdot v_w \cdot C_w (\bar{T}_{i,\tau} - \bar{T}_{o,\tau}) \quad (3)$$

$$E_r = \sum_{t_{r,start}}^{t_{r,end}} Q_{r,\tau} \cdot \tau \quad (4)$$

式中:  $Q_{c,\tau}$ 、 $Q_{r,\tau}$  分别为在时间  $\tau$  内集放热装置平均蓄积和释放的热量, kW;  $E_c$ 、 $E_r$  分别为集放热装置总的蓄积与释放的热量, kJ;  $\bar{T}_{i,\tau}$ 、 $\bar{T}_{o,\tau}$  分别为在时间  $\tau$  内装置进水、回水的温度平均值, °C;  $t_{c,start}$ 、 $t_{c,end}$  分别为集热阶段起、止时刻;  $t_{r,start}$ 、 $t_{r,end}$  分别为放热阶段起、止时刻;  $\rho_w$  为水的密度, kg/m<sup>3</sup>, 取值  $1.0 \times 10^3$ ;  $v_w$  为集热装置循环水的体积流量, m<sup>3</sup>/s;  $C_w$  为水的比热容, kJ/(kg·°C), 取值 4.2;  $\tau$  为测试期间记录数据的时间间隔取 10 min。

集放热装置的瞬时集热效率  $\eta_c$  可通过介质水获得的热量与照射到集放热装置上的太阳辐射量的比值求得:

$$\eta_c = \frac{Q_{c,\tau}}{A_c \cdot I_{c,\tau}} = \frac{\rho_w \cdot v_w \cdot C_w (\bar{T}_{o,\tau} - \bar{T}_{i,\tau})}{A_c \cdot I_{c,\tau}} \quad (5)$$

式中:  $A_c$  为集热面积, m<sup>2</sup>;  $I_{c,\tau}$  为在时间  $\tau$  内后墙内表面太阳辐射强度的平均值, W/m<sup>2</sup>。

集放热装置的集热效率  $\eta_c$ , 也可通过装置对太阳辐射的吸收量与装置和空气对流换热损失量的差值比上照射到装置上的总的太阳辐射量求得:

$$\eta_c = \frac{a \cdot A_c \cdot I_{c,\tau} - k \cdot A_c (\bar{T}_{plate,\tau} - \bar{T}_{g,\tau})}{A_c \cdot I_{c,\tau}} = a - \frac{k (\bar{T}_{plate,\tau} - \bar{T}_{g,\tau})}{I_{c,\tau}} \quad (6)$$

式中:  $a$  为金属膜集放热板对太阳辐射的平均吸收系数, 无量纲;  $k$  为装置表面与空气间的对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  $\bar{T}_{plate,\tau}$  为时间  $\tau$  内集放热板表面平均温度, °C;  $\bar{T}_{g,\tau}$  为时间  $\tau$  内试验温室平均空气温度, °C。结合式 (5) 与 (6), 即可求出金属膜集放热板对太阳辐射的平均吸收系数  $a$  和装置表面与空气间的对流换热系数  $k$ 。

集放热装置运行一个蓄热周期后, 总的蓄热效率  $\eta_{c,tot}$  可通过下式计算:

$$\eta_{c,tot} = \frac{E_c}{E_s} = \frac{E_c}{\sum_{t_{c,start}}^{t_{c,end}} A_c \cdot I_{c,\tau} \cdot \tau} \quad (7)$$

式中:  $E_s$  为照射到集放热装置上总的太阳辐射量, kJ。

### 1.3.2 节能效果分析

根据集放热装置的运行时间与水泵的运行功率即可得出消耗的电量  $E_{wp}$ , 根据式 (3) 和式 (4) 可推算出有效的放热量  $E_r$ , 若  $E_r$  为电加热产生的热量, 则可推算出节能率:

$$E_{wp} = 2W_{wp} \cdot h \cdot 3600 \quad (8)$$

$$R = \frac{E_r - E_{wp}}{E_r} \quad (9)$$

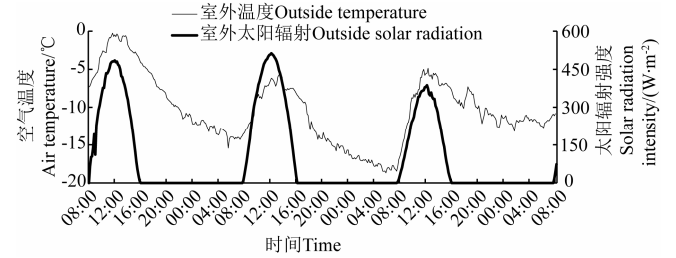
式中:  $R$  为温室采用金属膜集放热装置加热后的节能率;  $W_{wp}$  为水泵的功率, kW;  $h$  为水泵运行时间, h;  $E_{wp}$  为水泵消耗的电能, kJ。

## 2 结果与分析

### 2.1 增温效果分析

2012 年 12 月 22 日—25 日期间室外水平面太阳辐射和室外温度如图 2 所示。金属膜集放热装置是白天蓄积热量, 夜间再将蓄积的热量释放到温室中, 完成一个蓄、

放热周期, 所以定义从早上 08:30 到次日 08:30 为 1 d。12 月 22 日和 12 月 23 日为晴天, 12 月 24 日为阴天, 3 d 中室外太阳辐射强度最大值分别为 485、513 和 387 W/m<sup>2</sup>, 室外温度最高值分别为 -1、-6 和 -5°C, 室外温度最低值分别为 -14、-18 和 -12°C。



注: 2012-12-22至2012-12-25。下同。

Note: From Dec.22 to Dec.25, 2012. The same as below.

图 2 室外太阳辐射强度与温度随时间变化曲线

Fig.2 Time courses of outdoor solar radiation intensity and outdoor air temperature

试验温室与对照温室室内空气温度和后墙内表面太阳辐射强度如图 3 所示。3 d 温室后墙内表面太阳辐射强度最高分别达到了 434、508、383 W/m<sup>2</sup>, 温室内温度较高, 种植人员开启顶通风口 (11:00~14:00) 导致温室内温度波动较大, 两温室内的温差较大, 试验温室内温度明显高于对照温室, 蓄热时间段平均温差分别达到了 3.0、5.5、2.1°C, 但在盖上保温被后时刻, 两温室温差较小, 在开启集放热装置前 2 温室温差分别为 1.0、1.2、0.3°C, 开启金属膜集放热装置后, 试验温室内的气温瞬间升高并缓慢下降, 温度一直高于对照温室, 而对照温室内的气温持续下降, 在蓄热阶段对照温室的平均温度分别为 4.2、3.6、4.2°C, 而试验温室的平均温度为 7.3、7.3、7.0°C, 试验温室比对照温室平均分别高出 3.1、3.7、2.8°C, 消除由于白天通风和其他不可控因素带来的影响, 净增温分别为 2.1、2.5 和 2.5°C, 增温效果显著。

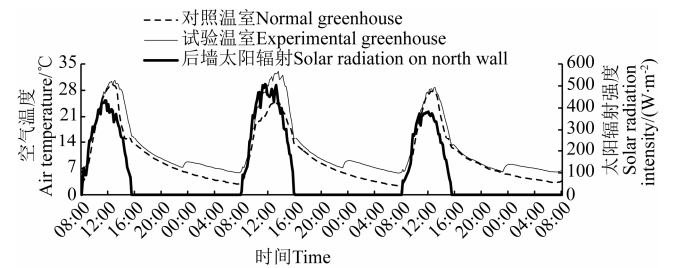


图 3 试验温室后墙内表面太阳辐射、空气温度和对照温室空气温度随时间变化曲线

Fig.3 Time courses of solar radiation at vertical back wall, air temperature in experimental and normal greenhouses

### 2.2 集放热性能与节能效果分析

白天蓄热阶段, 蓄热水池 3 d 温度变化分别为 12.8~30.2°C、15~35°C 和 16~30°C, 夜间放热阶段, 蓄热水池 3 d 温度变化分别为 26.0~15.0°C、30.0~16.0°C 和 26.0~16.0°C 之间变化。将试验期间装置蓄积的热量、释放的热量和装置表面太阳总辐射统计如表 2 所示。金属

膜集放热装置的性能可通过蓄积的热量和释放的热量来评价, 装置白天蓄积的热量  $E_c$  可由式 (1) 和 (2) 计算

得出, 夜间释放的热量可由式 (3) 和 (4) 计算得出, 太阳照射到金属膜集放热装置的总热量为  $E_s$ 。

表 2 不同试验时间段太阳总辐射及装置蓄积、释放的热量

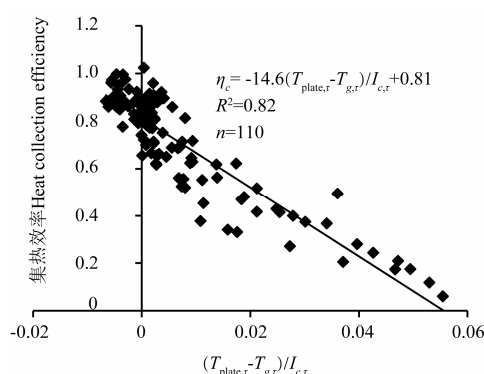
Table 2 Overview of total solar radiation quantities, collected and released energy at different stages and dates

日期 Date	装置表面太阳总辐射 Radiation sum at heat storage-release system $E_s$ /MJ	装置收集的热量 Total collected heat capacity $E_c$ /MJ	装置集热效率 Heat collecting efficiency $E_c/E_s$ /%	装置释放的热量 Total released heat capacity $E_r$ /MJ	能量利用效率 $E_r/E_c$ Utilization ratio of collected heat/%
2012-12-22~2012-12-23	256	221	86	143	64
2012-12-23~2012-12-24	318	260	82	182	70
2012-12-24~2012-12-25	221	182	82	130	71

金属膜集放热装置对能量的有效利用率可通过  $E_r/E_c$  求得, 如表 2 所示, 能量有效利用率平均值为 68%, 说明蓄热水池保温效果不理想, 通过蓄热水池维护结构损失的热量较大。装置集热效率由  $E_c/E_s$  计算, 试验期间装置集热效率达到了 82%, 明显优于双黑膜主动集放热装置<sup>[23]</sup>。

### 2.2.1 装置集热性能

通过式 (5) 计算求得装置的集热效率 (图 4), 试验期间有效数据为 110 组, 对数据进行线性拟合得出方程, 见图 4, 拟合直线  $R^2$  为 0.82, 说明拟合度高, 结合公式 (5) 和 (6) 可知方程的斜率即为集放热板与空气间的对流换热系数  $k$ , 值为  $14.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 比双黑膜蓄放热装置高  $6.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。线性方程在  $y$  轴上的截距表示集放热板温度  $\bar{T}_{\text{plate},\tau}$  与温室内空气温度  $\bar{T}_{g,\tau}$  相等, 对流换热量为 0, 此时集放热装置的集热效率为 0.81, 装置获得的热量完全来源于太阳辐射热, 即金属膜对太阳辐射的吸收系数  $a$  为 0.81, 比双黑膜集放热装置提高了 0.22。



注:  $T_{\text{plate},\tau}$ 、 $T_{g,\tau}$ 、 $I_{c,\tau}$  表示在时间  $\tau$  内集放热板的平均温度、试验温室的平均温度及后墙内表面平均太阳辐射强度。

Note:  $T_{\text{plate},\tau}$ ,  $T_{g,\tau}$ ,  $I_{c,\tau}$  are average plate temperature, greenhouse air temperature and solar radiation intensity on surface of greenhouse north wall during time  $\tau$ .

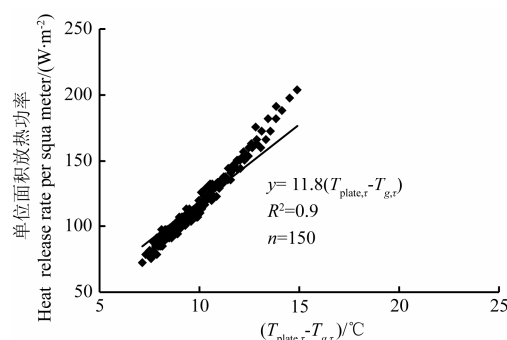
图 4 金属膜集热装置集热效率与  $(T_{\text{plate},\tau} - T_{g,\tau})/I_{c,\tau}$  的关系

Fig.4 Relationship between heat collection efficiency of heat storage-release metal film system and  $(T_{\text{plate},\tau} - T_{g,\tau})/I_{c,\tau}$

### 2.2.2 装置放热性能

分析金属膜集放热装置单位面积放热功率与室内和金属膜表面温差的关系 (图 5), 3 个夜间的有效数据为 150 组, 通过对 150 组数据进行线性拟合, 并保证直线方程经过 (0,0) 点, 因为当室内空气温度与膜表面温度相等时即  $\bar{T}_{\text{plate},\tau} - \bar{T}_{g,\tau} = 0$ , 装置不对外放热, 放热功率为 0, 此时拟合直线  $R^2$  为 0.9, 拟合度较高, 拟合直线的斜率即

为装置放热时与空气的对流换热系数, 值为  $11.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 金属膜集放热装置的有效集放热面积为  $35.34 \text{ m}^2$ , 则总放热功率范围为  $2.5 \sim 7.2 \text{ kW}$ , 总供热量为  $3.7 \sim 5.1 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。按温室栽培面积计算, 则金属膜集放热装置对温室供热功率为  $8.2 \sim 23.7 \text{ W}/\text{m}^2$ 。



注:  $T_{\text{plate},\tau}$ 、 $T_{g,\tau}$  表示在时间  $\tau$  内集放热板的平均温度和试验温室的平均温度。  
Note:  $T_{\text{plate},\tau}$ ,  $T_{g,\tau}$  are average plate temperature and average greenhouse air temperature during time  $\tau$ .

图 5 金属膜集放热装置单位面积放热功率受金属膜表面和室内温差的影响

Fig.5 Average heat release rate per  $\text{m}^2$  plates of heat storage-release metal film system as affected by temperature difference between plates and greenhouse air

金属膜集放热装置的节能率通过式 (8) 和 (9) 计算, 因为试验装置是白天蓄热夜间放热, 所以定义白天的蓄热阶段和紧接着的夜间的放热阶段为一个试验周期。3 个试验周期装置消耗的电功率分别为 41.0、41.4 和 40.1 MJ, 装置释放到温室中的热量分别为 143、182 和 130 MJ, 若释放到温室中的热量为电加热提供, 则金属膜集放热装置与电加热相比装置节能率分别为 71.3%、77.3%和 69.2%, 平均节能量为 110 MJ, 平均节能率为 72.6%, 节能效果明显。

## 3 结论与讨论

金属膜集放热装置白天以热辐射和热对流的模式收集太阳辐射和室内空气中的热量, 夜间再通过热对流的模式将热量释放到温室中, 以增加温室夜间温度, 通过本试验研究, 得出以下结论:

1) 运行金属膜集放热装置后温室内夜间温度提高了  $2.8 \sim 3.7^\circ\text{C}$ , 增温效果显著。金属膜集放热装置白天蓄热阶段对流换热系数为  $14.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 夜间放热阶段对流换热系数为  $11.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 白天换热系数大于夜间, 主

要原因是白天开窗进行通风, 增加了温室内气体流动, 进而增加了气体与装置的对流换热。

2) 试验期间装置集热效率达到了 83%, 对太阳辐射的吸收率为 0.81, 明显优于双黑膜主动集放热装置。

3) 与电加热相比金属膜集放热装置的平均节能量为 110 MJ, 平均节能率为 72.6%, 节能效果明显。

此外, 试验装置的供热量为  $3.7 \sim 5.1 \text{ MJ/m}^2$ , 而北京地区常规栽培日光温室后墙热量释放量为  $0.35 \sim 2.5 \text{ MJ/m}^2$ , 因此金属膜集放热装置能有效改善日光温室后墙的集放热功能。但当温室内空气温度低于装置表面温度时, 相应的集热效率也低, 因此可将热泵技术与金属膜主动集放热装置结合, 通过热泵将金属膜集放热装置蓄积的热量转移并储存起来, 降低循环液体温度, 即降低金属膜表面温度, 增加集放热装置的集热效率。

### 参 考 文 献

- [1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 3(2): 123—129.  
Li Tianlai. Current situation and prospects of greenhouse industry development in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 3(2): 123—129. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨建军, 邹志荣, 张智, 等. 西北地区日光温室土壤厚度及其保温性的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 180—185.  
Yang Jianjun, Zou Zhirong, Zhang Zhi, et al. Optimization of earth wall thickness and thermal insulation property of solar greenhouse in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 180—185. (in Chinese with English abstract)
- [3] 佟国红, 李保明. 面太阳辐射照度的模拟计算[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 61—65.  
Tong Guohong, Li Baoming. Simulation of solar radiation on surfaces of a solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(1): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭慧卿, 李振海, 张振武, 等. 日光温室北墙构造与室内温度环境的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1995, 26(2): 193—199.  
Guo Huiqing, Li Zhenhai, Zhang Zhenwu, et al. The relationship between the north wall construction and interior temperature environment in solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1995, 26(2): 193—199. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马承伟, 陆海, 李睿, 等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 231—237.  
Ma Chengwei, Lu Hai, Li Rui, et al. One-dimensional finite difference model and numerical simulation for heat transfer of wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 231—237. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李小芳, 陈青云. 墙体材料及其组合对日光温室墙体保温性能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 185—189.  
Li Xiaofang, Chen Qingyun. Effects of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of sunlight greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 185—189. (in Chinese with English abstract)
- [7] 佟国红, David M Christopher. 墙体材料对日光温室温度环境影响的 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 153—157.  
Tong Guohong, David M Christopher. Simulation of temperature variations for various wall materials in Chinese solar greenhouses using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张立芸, 徐刚毅, 马成伟, 等. 日光温室新型墙体结构性能分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 459—462.  
Zhang Liyun, Xu Gangyi, Ma Chengwei, et al. Application of aerated concrete in solar greenhouses[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37(3): 459—462. (in Chinese with English abstract)
- [9] 白义奎, 迟道才, 王铁良, 等. 日光温室燃池: 地中热交换系统加热效果的初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 178—181.  
Bai Yikui, Chi Daocai, Wang Tieliang, et al. Experimental research of heating by fire-pit and underground heating exchange system in a solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 178—181. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈紫光, 陈超, 凌浩恕, 等. 日光温室专用多曲面槽式太阳能空气集热器热工性能试验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(8): 58—63.  
Chen Ziguang, Chen Chao, Ling Haoshu, et al. Experimental study on thermal performance for the specialized multiple curved surfaces trough solar air collector dedicated to solar greenhouse[J]. Building Science, 2014, 30(8): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [11] 于威, 王铁良, 刘文合, 等. 太阳能土壤加温系统在日光温室土壤加温中的应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 190—194.  
Yu Wei, Wang Tieliang, Liu Wenhe, et al. Application research on the heating effect of solar geothermal heating system on soil temperature in the solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 190—194. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李炳海, 须晖, 李天来, 等. 日光温室太阳能地热加温系统应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(2): 152—155.  
Li Binghai, Xu Hui, Li Tianlai, et al. Application of solar energy soil heating system in greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(2): 152—155. (in Chinese with English abstract)
- [13] 管勇, 陈超, 凌浩恕, 等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 166—173.  
Guan Yong, Chen Chao, Ling Haoshu, et al. Analysis of heat transfer properties of three-layer wall with phase-change heat storage in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 166—173. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 Chao, Guo Haifeng, Zhou Wei. Experimental research of the composite phase change material in greenhouse[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(3): 287—293. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张勇, 邹志荣, 李建明, 等. 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 Yong, Zou Zhirong, Li Jianming, et al. Preparation of the small concrete hollow block with PCM and its efficacy in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 263—267. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王宏丽, 邹志荣, 陈红武, 等. 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 Hongli, Zou Zhirong, Chen Hongwu, et al. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 304—307. (in Chinese with English abstract)

- [17] 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 Hongli, Li Xiaoye, Zou Zhirong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 253—257. (in Chinese with English abstract)
- [18] 丁小明, 何芬, 段静, 等. 基于毛细管换热器的日光温室低温供暖系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 178—184. Ding Xiaoming, He Fen, Duan Jing, et al. Design of low temperature heating system in solar greenhouse using capillary tube mat exchanger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 178—184. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张义, 杨其长, 方慧. 日光温室水幕帘蓄放热系统增温效应试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 188—193. Zhang Yi, Yang Qichang, Fang Hui. Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 188—193. (in Chinese with English abstract)
- [20] 梁浩, 方慧, 杨其长, 等. 日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 187—193. Liang Hao, Fang Hui, Yang Qichang, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 187—193. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yang Qichang, Zhang Yi, Fang Hui, et al. An active heat storage-release system using circulating water to supplement heat in a Chinese solar greenhouse[J]. Acta Hort, 2013, 1037: 49—56.
- [22] 周长吉, 丁小明. 温室采暖设计室外计算温度取值方法探讨[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 161—165. Zhou Changji, Ding Xiaoming. Outside temperature for heating load in greenhouse design[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 161—165. (In Chinese with English abstract)
- [23] Fang Hui, Zhang Yi, Yang Qichang, et al. Performance of a solar heat collection and release system for improving night temperature in a Chinese solar greenhouse[J]. Applied Engineering in Agriculture of the ASABE, 2015, 32(2): 283—289.

## Performance testing on warming effect of heat storage-release metal film in Chinese solar greenhouse

Fang Hui, Zhang Yi<sup>\*</sup>, Yang Qichang, Lu Wei, Zhou Bo, Zhou Sheng

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;  
2. Key Lab of Energy Conservation and Waster Treatment of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Chinese Solar Greenhouse (CSG) that is widely used in North China is characterized by a lean-to south-facing roof, a removable insulating blanket and a solid north wall. The south facing roof structure and removable insulating blanket maximize the exposure to short-wave radiation during the day and minimize heat loss at night, respectively. To increase the year-round greenhouse production in North China, a sustainable heating method needs to be developed to increase the night air temperature during the winter in CSGs. Solar heating is an inexpensive and effective way to heat greenhouses, and has been investigated by several previous studies. For the present study, a heat storage-release metal film system that was attached to the north wall was developed for CSG night temperature improvement. Two experimental greenhouses were located in Beijing, China, with a floor area of 304 m<sup>2</sup> each. Environmental parameters (temperature, humidity, heat flux) inside and outside the greenhouse were investigated, including the average solar collection efficiency of the heating system and the energy saving rates. The results showed that the average solar collection efficiency of the system was 83%, 1.6 times greater than the reported value of a heat storage-release metal film system installed in a small CSG. The energy collection efficiency during the daytime decreased sharply with declining plate-air temperature differences. To have high energy collection efficiencies, plate-air temperature differences must be kept high and this can be achieved by applying a heat pump to reduce the circulating water temperature and transfer the energy to another water tank. The effective collector absorptivity was 0.81 and heat transfer was by natural convection. During the relatively cold nights of December 23 and 24 with the lowest outdoor air temperature of approximately -18°C, the inside air temperature of the experimental CSG also was 3.7°C higher than in the reference CSG after starting operation of the heat storage-release metal film system. The night air temperature in the experimental CSG was increased by 2.4°C on average compared to the reference CSG. The performance of the heat storage-release metal film system can be analyzed via the collected and released heat. The variations of the total heat collected and released by the heat storage-release metal film system during the day/night periods investigated were presented together with the radiation sum at the back wall over the total area of the heat storage-release metal film system. The system collected much more energy during sunny days than during cloudy days. The utilization ratio of the collected heat of the heat storage-release metal film system was calculated and it was between 64% and 71%. So the collected heat was not utilised completely during the night as some heat was lost during transport and storage. The heat collecting efficiency for these days was calculated as 86%, 82% and 82%, respectively which was nearly constant. So the use of the heat storage-release metal film system for heating the greenhouse at night during the winter can improve the environmental conditions inside Chinese solar greenhouses for crop production, achieving high energy collection efficiency and a reduction in energy consumption.

**Key words:** greenhouses; heating equipment; heat storage; energy conservation; heat release; Chinese solar greenhouse