

基于毛细管换热器的日光温室低温供暖系统设计

丁小明^{1,2}, 何 芬^{1,2}, 段 静^{1,2}, 连青龙^{1,2}, 张秋生^{1,2}

(1. 农业部规划设计研究院设施农业研究所, 北京 100125; 2. 农业部农业设施结构工程重点实验室, 北京 100125)

摘 要: 为将毛细管换热器应用于日光温室中, 该文试验测试了毛细管换热器的热工性能和流动阻力, 得到毛细管换热器在 0.0306、0.0222 和 0.0139 kg/s 流量下散热量与过余温度 (20~50℃ 范围内) 的关系曲线以及相应阻力和流量的变化关系曲线。在低于 40℃ 的低温热水供暖状态时, 在 25~30℃ 的过余温度下毛细管换热器垂直放置时可提供 258~323 W/m² 的散热量, 而水平放置时散热量达到 307~381 W/m²。在此基础上, 设计了一套采用生物质固体成型燃料供热的基于毛细管换热器的日光温室低温供暖系统, 试验温室和对照温室建筑面积均为 518.5 m²。测试结果表明, 采用合理的供暖方案, 在每天燃烧秸秆固体成型燃料 125 kg 能保证试验温室夜间平均冠层气温 10℃ 以上, -15 cm 土壤温度 15℃ 以上, 与对照温室相比, 夜间平均气温、最低气温和 -15 cm 土壤温度分别提高了 9.0、6.5 和 5.7℃。

关键词: 温室, 毛细管, 换热器, 日光温室, 热工性能, 流动阻力

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.022

中图分类号: S625.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0178-07

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)

0 引 言

能耗问题一直是制约设施园艺经济效益的主要障碍之一。不加温的日光温室在中国发展迅猛。但不加温的日光温室室内最低温度大多为 0~8℃, 夜间相对湿度在 80% 以上, 蔬菜生产的冻害和病虫害经常发生, 影响着设施蔬菜等园艺产品的安全有效供给能力^[1-4]。

目前日光温室内冬季采暖, 主要有热风炉、热水锅炉加普通散热器供暖, 这些供暖方式不仅耗能大, 而且局部区域有时还会温度过高, 在温室内产生明显的温度梯度, 有时候还造成作物热灼伤。因此, 探索日光温室内适宜的采暖方式一直是园艺从业者的重要任务。

充分利用太阳能的光热资源是日光温室主动蓄热加温研究的重点, 刘伯聪等^[5]研究了应用于在日光温室外布置由全真空玻璃管组成的太阳能集热器, 可使 -20 和 -40 cm 土壤平均温度在 19℃ 以上,

平均气温夜间 13.9℃ 以上。于威等^[6]研究了太阳能集热器配合地埋管在不同埋深时的加温效果, 可提高地温 3.1~3.5℃。李炳海^[7]在日光温室内使用地热加温系统后, 室内最低气温提高不大, 而对 -15 cm 地温的提高 2~3℃。方慧^[8-9]研究了基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热方法, 白天通过设置在日光温室后墙内侧的水媒集热器将热量收集, 提高土壤温度, 晚上通过土壤自然散热的方式, 将热量释放到室内, 夜间平均温度提高 4.2℃, -30 cm 土壤平均温度提高 3.0℃。而夜间开启热泵后, 将土壤浅层热量转移到后墙, 环境温度和土壤温度较对照温室分别提高 5.7 和 2.9℃。上述研究将白天太阳能进入日光温室产生的热量主动蓄积到水或土壤中, 提高了日光温室夜间温度, 不足之处是必须要保证白天有足够的太阳能。与上述利用太阳能不同, 徐刚毅等^[10]利用电锅炉进行土壤加温系统研究, 气温提高 2~3℃, -15 cm 地温达到 19.8℃。充分利用土壤或水作为蓄放热载体, 将太阳能或电能的热量转移到土壤或水中, 在日光温室室内温度降低时作为热源是目前研究最多的日光温室主动蓄放热技术。

上述研究表明, 提高土壤温度, 对于土栽温室可以保证作物的根际生长温度, 同时对环境温度也有一定的提高。与主动蓄放热技术不同, 目前使用

收稿日期: 2013-03-28 修订日期: 2013-08-25

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203002); 北京市科技计划 (Z111105055111006)

作者简介: 丁小明 (1976—), 男, 高级工程师, 主要从事设施农业技术标准 and 装备研究开发工作。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院 设施农业研究所, 100125。Email: dingxmcn@qq.com

较多的还是利用外部能源直接对室内空气进行加热。直接对室内空气加热无疑是快速提高作物生长环境温度的主要方式。在日光温室内低品位热源的开发利用中^[12], 张晓慧等^[13]利用地源热泵加风机盘管的方式给日光温室供暖。当室外最低温度为 -5°C 时, -20 cm 地温能保证 15°C , 而室内气温维持 18°C 以上。

中国具有丰富的工业余热和可再生能源, 能提供大量的低温热源^[11]。在工业生产中, 冷却系统和冷凝系统产生大量热水, 其中 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的余热水很难利用, 往往直接排掉, 不仅浪费热能, 而且会造成热污染。与土壤辐射散热和风机盘管的强制对流散热方式不同, 毛细管作为一种新型换热器, 可以高效利用低品位热源, 具有散热面积大、安装方便、容易维护等特点^[14-17], 近几年在民用建筑上得到采用。除此之外, 毛细管换热器具有双效功能, 不仅可以作为加温还可用于制冷。在民用建筑领域, 毛细管换热器的研究大多集中在工程案例上, 但对于毛细管换热器的热工性能和流动阻力, 国内的研究相对较少。傅允准等^[18]研究毛细管换热器采暖地板的辐射采暖特性, 证明该系统室内温升快和温度场分布均匀。王婷婷等^[19]利用理论分析的方法, 从热工性能方面分析了毛细管网敷设在天花板、地板、墙面情况下的辐射角系数, 认为相对于室内人体得热来说, 天花板安装最好, 其次墙面安装, 再次是地面安装。张亮^[20]通过对地源热泵联合毛细管空调系统进行热力学理论分析, 将地源热泵与毛细管建立模型, 结合实例, 将毛细管换热器与风机盘管散热相比, 毛细管的焓效率为 88.62% , 比风机盘管的焓效率 66.37% 高 22.25% 。黄金强等^[21]以太阳能热水供暖和热风供暖为基础, 结合相变储能和毛细管网技术的特点, 提出了太阳能热利用集成技术方案。Mejdi 等^[22-23]试验研究了热泵和毛细管换热器组成的系统性能, 结果表明, 毛细管换热器的长度不宜超过 3 m , 理想的供水温度应控制在 $22\sim 50^{\circ}\text{C}$, 同时认为流量超过 180 L/h , 对增加换热效果不明显。Lazaar 等^[24-25]将毛细管换热器引入到温室加热系统的研究中, 将毛细管换热器埋设在地下 70 cm , 取得了较好的加热效果。

本研究将毛细管换热器应用到日光温室的加温系统设计中, 设计了一套基于毛细管换热器的日光温室低温供暖系统。针对毛细管换热器在日光温室内的使用特点, 测试了不同布置方式下不同流量下和不同过余温度下的毛细管换热器的热工性能和流动阻力。并将该系统应用到日光温室的实际生产使用中, 比较了不同加热模式下的温室内温度分布, 并与对照日光温室进行了比较。

1 毛细管换热器热工性能和流动阻力测试

1.1 器材、安装及测试方法

毛细管换热器为国产, 样品长度 $2\,800\text{ mm}$, 宽度 600 mm , 毛细管间距 20 mm , 毛细管直径 4 mm , 内径 2 mm 。热工性能测试按照采暖散热器散热量测定方法(GB/T 13754-2008)。样品垂直安装时, 样品背部与墙之间加 50 mm 隔热板, 底部靠地, 垂直于地面。连接方式为异侧进出, 供水管的长度 L 为 $2\,600\text{ mm}$, 保温良好, 有一定坡度。样品水平安装时, 样品平铺于距地 600 mm 高的苗床上, 苗床放置在实验室热工小室中心, 样品中心处于地面中心位置, 与热工小室地面呈中心对称。连接方式为异侧进出, 供水管长度 L 为 800 mm , 保温良好, 有一定坡度。

流动阻力根据微灌用聚乙烯(PE)管件局部水头损失系数试验方法(SL/T 69-1994), 样品规格同热工性能, 分别测试不同流量下的阻力。样品布置形式分为2种, 一种平行于地面, 一种垂直于地面。

1.2 热工性能测试结果

样品垂直放置时, 3种流量下的散热量与过余温度见图1a。测试结果表明, 垂直放置时, 3种流量下的散热量差别很小, 不超过 1% 。

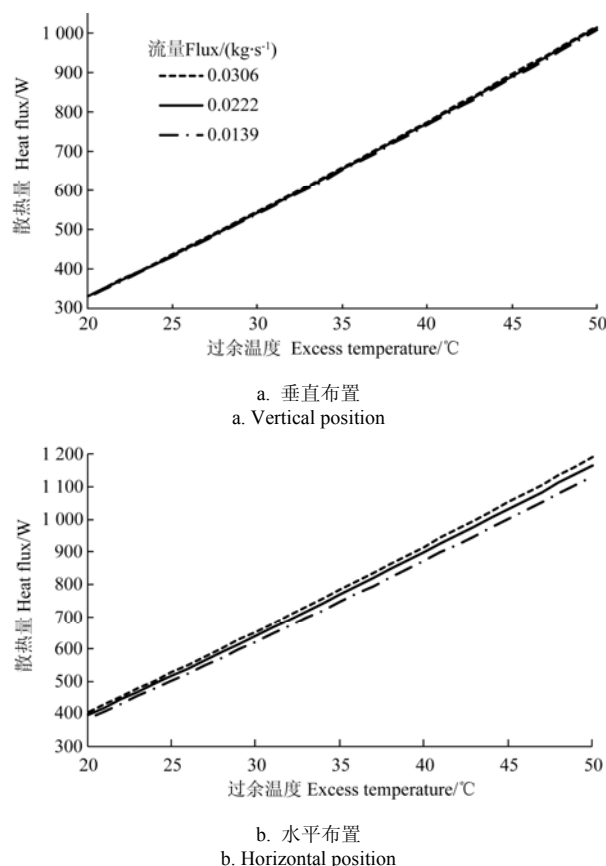


图 1 散热量与过余温度关系曲线

Fig.1 Relationship of heat flux with excess temperature

根据图 1a 测试结果, 拟合出毛细管换热器的散热量 Q 与过余温度 ΔT 及流量 G 的关系, 见式(1)。

$$Q = 8.8768 \Delta T^{1.2355} G^{0.0141} \quad (1)$$

式中, Q 为毛细管换热器散热量, W; ΔT 为过余温度, $^{\circ}\text{C}$; G 为流经毛细管换热器的流量, kg/s 。

样品水平放置时, 3 种流量下的散热量与过余温度见图 1b。测试结果表明, 水平放置时, 3 种流量下的散热量较垂直布置时有较大差别, 流量越大, 散热量越大, 但差别不大于 5%。

根据图 1b 测试结果, 拟合出毛细管换热器的散热量 Q 与过余温度 ΔT 及流量 G 关系, 见式(2)。

$$Q = 14.8130 \Delta T^{1.1766} G^{0.0621} \quad (2)$$

由图 1 可知, 相同过余温度、相同流量下, 水平放置比垂直放置具有更好的散热效果, 两者相差 15%。

1.3 流动阻力测试结果

流体流经毛细管换热器时, 会引起流速的大小、方向或分布的变化, 因此产生局部阻力损失。局部损失的种类繁多, 体型各异, 加以紊流本身的复杂性, 多数局部阻碍的损失计算, 还不能从理论上解决。借助试验确定毛细管换热器的局部阻力系数, 进而确定毛细管的局部阻力损失。局部阻力系数一般用流速水头的倍数来表示, 见式(3)。

$$hm = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中, hm 为局部水头损失, Pa; ξ 为局部阻力系数; v 为断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

试验测试的阻力和局部阻力系数与流量关系曲线如图 2 所示。

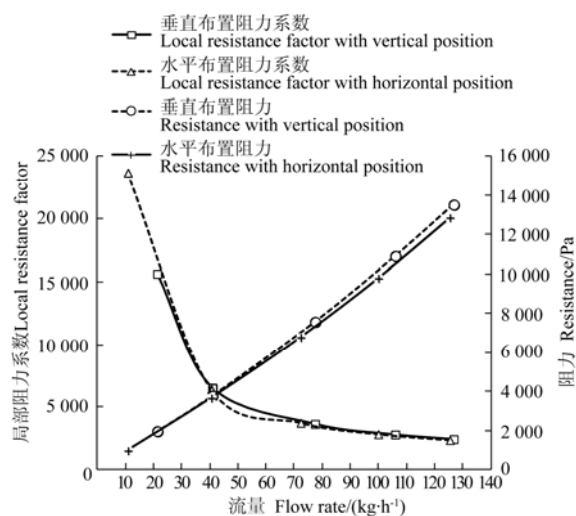


图2 阻力和局部阻力系数与流量关系曲线

Fig.2 Relationship of resistance and local resistance factor with flow rate

由图 2 可知, 水平和垂直 2 种布置方式对毛细管的阻力和局部阻力系数没有明显影响。随着流量的增大, 局部阻力系数呈现指数下降趋势, 并在流量大于 100 kg/h 趋于平缓。当流量为 77 kg/h 时, 样品的局部阻力系数为 3 700 左右, 远大于普通散热器的局部阻力系数。

2 日光温室供暖系统设计

2.1 日光温室采暖负荷计算

日光温室位于北京市昌平区北农科技园内, 温室建设于 2007 年, 建筑面积为 518.5 m^2 , 室内跨度 6.8 m , 长度 63 m , 脊高 3.5 m , 后墙高度 2.3 m , 后墙间隔 4 m 设置 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的通风窗, 后墙由 120 mm 黏土砖+ 100 mm 苯板+ 240 mm 黏土砖组成。室外设计参数: 冬季采暖室外计算干球温度采用北京 20 a 极端气温平均值为 -13°C [26], 冬季通风计算温度为 -5°C , 室外平均风速为 2.8 m/s 。室内设计温度为 15°C 。后墙、山墙传热系数为 $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 门窗传热系数为 $4.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。地面传热系数分段计算, 距前屋面底角距离 $0 \sim 2 \text{ m}$ 区域、 $>2 \sim 4 \text{ m}$ 区域、 $>4 \sim 6 \text{ m}$ 区域分别取值 0.47 、 0.23 、 $0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [27]。

采暖热负荷计算, 见式(4)。

$$Q_t = [\sum KF(t_n - t_w)\alpha(1 + x_f + x_{ch})](1 + x_g) + Q_d \quad (4)$$

式中, t_n 为室内设计温度, $^{\circ}\text{C}$; t_w 为室外计算温度, $^{\circ}\text{C}$; K 为温室覆盖材料的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; F 为温室外围护结构面积, m^2 ; α 为温室修正系数, 取 1.0 ; x_f 为风力附加率, 取 3% ; x_{ch} 为朝向修正率, 取 10% ; x_g 为高度附加率, 取 5% [27]。 Q_d 为地面热损失, W。地面热损失计算, 见式(5)。

$$Q_d = \sum u_i A_i (t_n - t_w) \quad (5)$$

式中, u_i 为第 i 区地面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_i 为第 i 区地面面积, m^2 。

经计算得温室采暖总负荷为 32 kW , 热指标约为 75 W/m^2 。

2.2 毛细管供暖系统设计

日光温室热源采用生物质热水锅炉, 考虑到试验工况的要求, 采用了 80 kW 的锅炉, 对于当前试验, 选用锅炉的热负荷较之设计值负荷偏大, 供水温度为 60°C , 采用三通混水阀制备 35°C 二次水作为毛细管换热器的热媒。系统供回水温差为 10°C , 管网系统的工作压力为 0.3 MPa 。

毛细管供暖系统详见图 3a。受到日光温室室内草莓栽培工艺采用高垄土栽的限制, 毛细管换热器采用垂直安装, 均匀布置在温室后墙及两侧山墙上, 主管管采用 PPR 管, 上供上回同程布置, 见图 3b。

所布置毛细管换热器单片规格为 $2\,800\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ，总面积约 120 m^2 。根据热工检测图 1b，所有毛细管换热器总散热量为 39 kW ，满足设计负荷。为了夜间温度不至于太高，对草莓产生影响，系统设置当夜间室内环境温度高于 15°C 时，毛细管换热器供暖系统自动关闭，当低于 15°C 时，自动开启。

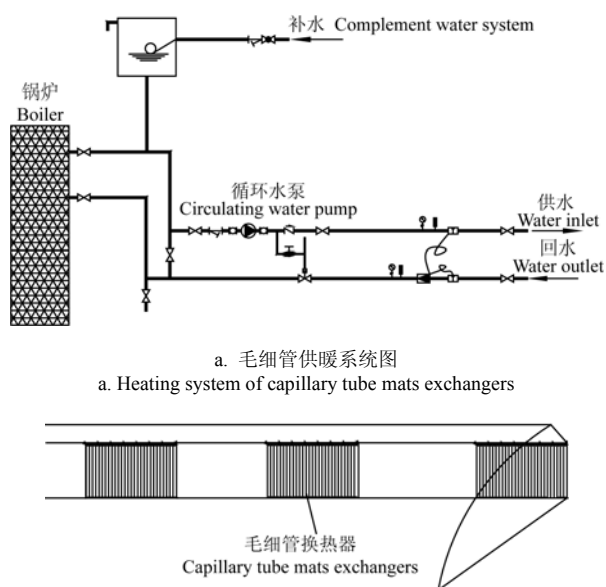


图 3 毛细管换热器供暖系统

Fig.3 Heating system in solar greenhouse using capillary tube mat exchanger

3 应用效果测试

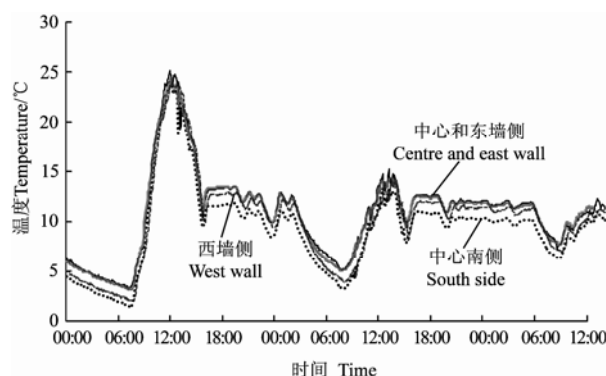
3.1 测试方法

为了分析供暖系统的使用效果，测试了室内温度均匀性。在距离东山墙 7 m 的东墙侧、距离西山墙 7 m 的西墙侧的跨中位置、温室中部中心位置和距离前屋面底角 0.6 m 中心南侧布置了 4 个测点，测点位于草莓的冠层区域（距离栽培垄 20 cm 高处）。此外，以对照温室为对象比较了温室内的温度情况，选择位于同一园区内的 2 栋完全相同的日光温室，同为草莓种植，管理方式相同，一栋安装毛细管供暖系统，另一栋不加温。分别测试 2 栋日光温室中心区域草莓冠层区域（距离栽培垄 20 cm 高处）和距离垄表面埋深 15 cm 土壤温度。测试仪器均选用智能土壤温度记录仪 TJ1（温度测量范围为 $-40 \sim 120^\circ\text{C}$ ，测量允许误差 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ）。2012 年 12 月 26 日加秸秆固体成型燃料 125 kg ，12 月 27 日（阴天）加秸秆固体成型燃料 200 kg ，所采用的秸秆固体成型燃料热值约为 2000 kcal/kg 。12 月 26 日—28 日室外最低温度分别为 -15°C 、 -14°C 和 -13°C 。2013 年 1 月 4 日—9 日（其中 1 月 7 日没有加秸秆

固体成型燃料），每天加秸秆固体成型燃料 125 kg 。

3.2 室内温度均匀性测试结果

由图 4 可知，在加温期间，在东西长度方向上，靠近东墙的温度和中间的温度差异最小，相差 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}$ ，而靠近西山墙的温度与中间的温度差异达 1.6°C 。在跨度方向上，中心南侧与中心位置温度差 0.7°C 。由于温室加温前，所有测量点的温度相差不到 0.3°C ，可见采暖系统启动后，造成了温室在东西长度方向和跨度方向的温度差，东西温差与系统供暖方向由东向西有关，而跨度方向与毛细管换热器布置在后墙有关。



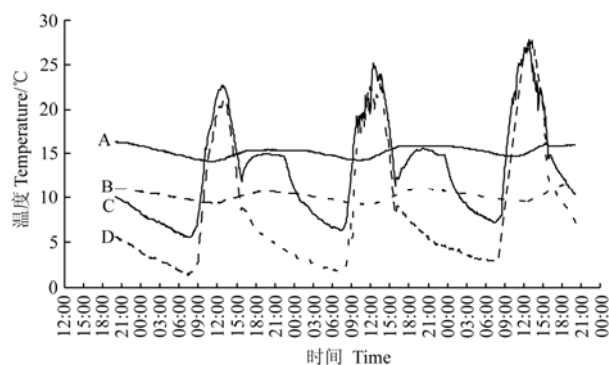
注：时间为 2012 年 12 月 26 日 00:00 至 12 月 28 日 12:00。
Note: Time from 00:00, Dec.26th, 2012 to 12:00 Dec.28th, 2012.

图 4 加温温室室内温度均匀性测试

Fig.4 Air temperature uniformity test in heating greenhouse

3.3 与对照温室测试结果

测试结果见图 5 和表 1。从图 5 可知，毛细管供暖系统在下午开启后，温室内温度明显回升。从表 1 可知，室内夜间平均气温、最低气温和 -15 cm 地温在加温的情况下（不包含 1 月 7 日数据）较对照温室高出 9.0 、 6.5 和 5.7°C 。



注：A 为加温温室 -15 cm 地温， -15 cm depth soil temperature in heating solar greenhouse; B 为对照温室 -15 cm 地温， -15 cm depth soil temperature in heating solar greenhouse; C 为加温温室室内空气温度，air temperature in heating solar greenhouse; D 为对照温室室内空气温度，air temperature in compared solar greenhouse。时间为 2013 年 1 月 3 日 20:00 至 1 月 6 日 20:00，Time from 20:00, JAN. 3TH, 2013 to 20:00 JAN. 6TH, 2013.

图 5 加温温室和对照温室室内空气和地温对照

Fig.5 Air temperature and soil temperature -15 cm depth in heating and compared greenhouse

表 1 6 d 测试结果比较表
Table 1 Test results of 6 days

日期 Date	加温温室 Heating solar greenhouse/°C				对照温室 Compared solar temperature/°C				室外温度 Outside temperature/°C	
	夜间气温 Air temperature at night		夜间-15 cm 地温 -15 cm depth soil temperature at night		夜间气温 Air temperature at night		夜间-15 cm 地温 -15 cm depth soil temperature at night		最低值 Minimum	最高值 Maximum
	平均值 Average	最低值 Minimum	平均值 Average	最低值 Minimum	平均值 Average	最低值 Minimum	平均值 Average	最低值 Minimum		
2013-01-04	12.0	6.7	15.8	15.1	2.1	-0.1	10.1	9.4	-13	-2
2013-01-05	12.2	8.0	15.9	15.3	3.0	0.9	10.2	9.5	-8	0
2013-01-06	12.1	7.3	16.4	15.7	2.9	1.1	10.4	9.7	-11	0
2013-01-07	7.6	5.5	15.5	14.5	3.8	2.7	9.6	9.3	-12	0
2013-01-08	9.9	6.3	15.1	14.5	2.4	0.7	10.0	9.3	-11	-2
2013-01-09	11.0	7.2	15.6	14.9	1.9	0.4	9.7	9.0	-12	0

注：夜间气温平均值计算时间为 20:00 至次日 08:00。

Note: Night time from 20:00 to 08:00.

4 结论与讨论

1) 在 0.0306、0.0222 和 0.0139 kg/s 流量和过余温度在 20~50℃ 范围内测试了水平和垂直 2 种不同放置方式的毛细管换热器散热量和阻力的变化规律。在 25~30℃ 的过余温度下毛细管换热器垂直放置时散热量为 258~323 W/m²，而水平放置时散热量达到 307~381 W/m²。可见毛细管换热器在低温供水状态下就可以达到传统高温散热器的散热效果，而且供水流量变化时，散热量变化不大。

2) 将毛细管换热器采用垂直安装的方式布置在日光温室后墙和山墙，采用生物质固体秸秆成型燃料供热，测试结果表明，采用合理的供暖方案，系统在每天燃烧 125 kg 秸秆固体成型燃料能保证温室夜间平均冠层气温 10℃ 以上，-15cm 土壤温度 15℃ 以上，与对照温室相比，夜间平均气温、最低气温和-15cm 土壤温度分别提高了 9.0、6.5 和 5.7℃。

3) 将该换热器应用到日光温室冬季生产采暖中，不仅可以发挥其低温热水供暖下散热量大的优势，还可以充分利用生物质等可再生能源。该系统没有采用从中间向东西两侧供回水设计造成了东西方向的温度分布不均匀，温度梯度达 1.6℃。但在跨度方向上，温差较小。

目前秸秆固体成型燃料仍然存在着燃烧点火困难，结渣严重，燃烧效率低等问题影响了该系统的使用效果；采用毛细管换热器裸装于日光温室内使用是可行性的，但以聚丙烯为主要原料的毛细管换热器其防止温室内光老化的措施还需要进一步深入研究；毛细管换热器成本较高，价格在 60~100 元/m² 之间，从经济性考虑，更适合对室内环境要求较高，且附加值也较高的温室作物的生产，如育苗生产。此外，毛细管换热器若应用于苗床加温时可充分发挥水平安装散热量大和均匀的优点。

[参 考 文 献]

- [1] 张志录, 王思倩, 刘中华, 等. 下沉式日光温室土质墙体热特性的试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 208—215.
Zhang Zhilu, Wang Siqian, Liu Zhonghua, et al. Experiment and analysis on thermal characteristics of cob wall in sunken solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 208—215. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘玉凤, 邹志荣, 蒋国振. 跨度对日光温室气温和番茄生长的影响及模拟分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 204—209.
Liu Yufeng, Zou Zhirong, Jiang Guozhen. Effects of span on solar greenhouse's air temperature and tomato growth and analysis of simulation[J]. Journal of Northwest A and F University: Nat Sci Ed, 2012, 40(1): 204—209. (in Chinese with English abstract)
- [3] Yuan Jing, Li Shujun, Cui Jianyun, et al. Characters of temperature variation and minimal temperature forecast inside of solar greenhouse in winter in Shouguang city of Shandong province[J]. Agricultural Science and Technology, 2012, 13(9): 2001—2005.
- [4] 郭正昊, 于海业. 日光温室空气湿度预测模型构建与验证[J]. 农机化研究, 2012(3): 94—97.
Guo Zhenghao, Yu Haiye. Forecast model construction and confirmation of air humidity in sunlight greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(3): 94—97. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘伯聪, 曲梅, 苗妍秀, 等. 太阳能蓄热系统在日光温室中的应用效果[J]. 北方园艺, 2012(10): 48—53.
Liu Bocong, Qu Mei, Miao Yanxiu, et al. The effect of a solar heat storage system applied in the solar greenhouses[J]. Northern Horticulture, 2012(10): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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 Hui, Yang Qichang, Zhang Yi. 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 210—216. (in Chinese with English abstract)
- [10] 徐刚毅, 刘明池, 李武. 电锅炉供暖日光温室土壤加温系统[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14): 171—174.
- Xu Gangyi, Liu Mingchi, Li Wu. Effect of electric boiler heating system for soil warming in solar greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(14): 171—174. (in Chinese with English abstract)
- [11] 江亿. 我国建筑能耗趋势与节能重点[J]. 建设科技, 2006(7): 10—13, 15.
- [12] 方慧, 杨其长, 王楠, 等. 浅层地热源节能技术及其在设施农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 286—290.
- Fang Hui, Yang Qichang, Wang Nan, et al. Geothermal technology and its applications in protected agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 286—290. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张晓慧, 陈青云, 曲梅, 等. 地源热泵空调系统在日光温室中的加温效果[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 436—439.
- Zhang Xiaohui, Chen Qingyun, Qu Mei, et al. Heating effects of ground source heat pump on sun-light greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 436—439. (in Chinese with English abstract)
- [14] Capillary tube technology for heating and cooling systems[EB/OL]. <http://www.clima.de/Anwendungen/Kuehl-Heizdecken/index.php>.
- [15] Plaster ceiling with BEKA heating and cooling mats [EB/OL]. <http://www.beka-klima.de/en/downloads.html>, 2002-08.
- [16] 蒋露. 毛细管平面空调系统室内热环境数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学. 2007.
- Jiang Lu. Numerical Simulation for the Indoor Thermal Environment of Capillary Plane HNAS System[D]. Beijing: North China Electric Power University. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邵春廷, 狄文静, 赵加宁, 等. 毛细管供热饰板材料热工性能及其设计选择方法研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(11): 92—95.
- Shao Chunting, Di Wenjing, Zhao Jianing, et al. Research on thermal performance and selection method of capillary decorative panel for heating[J]. Journal of HV and AC, 2009, 39(11): 92—95. (in Chinese with English abstract)
- [18] 傅允准, 蔡颖玲, 陈帅, 等. 毛细管地板辐射采暖特性试验研究[J]. 流体机械, 2009, 37(8): 54—57, 70.
- Fu Yunzhun, Cai Yingling, Chen Shuai, et al. Experimental study on characteristic of floor radiant heating of capillary tube[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8): 54—57, 70. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王婷婷, 李永安. 基于采暖工况的毛细管网不同敷设方式热工性能分析[J]. 制冷与空调, 2012, 26(4): 341—344.
- Wang Tingting, Li Yong'an. Thermal performance analysis of capillary network on different laying modes in heating condition[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2012, 26(4): 341—344. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张亮. 地源热泵和毛细管网空调系统的热力学分析[J]. 制冷与空调, 2010, 24(3): 104—107.
- Zhang Liang. Ground source heat pump capillary network thermodynamic analysis of air-conditioning system[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2010, 24(3): 104—107. (in Chinese with English abstract)
- [21] 黄金强, 罗继杰, 冯国会. 基于相变储能和毛细管网末端的太阳能利用集成系统[J]. 暖通空调, 2012, 42(6): 110—113.
- Huang Jinqiang, Luo Jijie, Feng Guohui. Solar energy system based on phase change material energy storage and capillary mat terminal[J]. Journal of HV and AC, 2012, 42(6): 110—113. (in Chinese with English abstract)
- [22] Mejdí Hazami, Sami Kooli, Mariem Lazaar, et al. Capillary polypropylene exchangers for conditioning of museum aquariums (Tunisia)[J]. Desalination, 2004, 166(8): 443—448.
- [23] Mejdí Hazami, Sami Kooli, Mariem Lazaar, et al. Heat transfer characteristics of a capillary heat exchanger based air conditioning cupboard[J]. Desalination, 2004, 166(8): 435—442.
- [24] Mejdí Hazami, Sami Kooli, Meriam Lazaar, et al. Thermal performance of a solar heat storage accumulator

- used for greenhouses conditioning[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2005, 1(4): 270—277.
- [25] Lazaar M, Kooli S, Hazami M, et al. Thermal energy storage in the ground of a greenhouse by the polypropylene capillary heat exchanger[J]. American Journal of Applied Sciences, 2008, 5(12): 1769—1772.
- [26] 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)
- [27] 周长吉. 现代温室工程(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 195—202.

Design of low temperature heating system in solar greenhouse using capillary tube mat exchanger

Ding Xiaoming^{1,2}, He Fen^{1,2}, Duan Jing^{1,2}, Lian Qinglong^{1,2}, Zhang Qiusheng^{1,2}

(1. Institute of Protected Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China; 2. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Construction, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)

Abstract: Solanaceous fruit vegetables are able to be planted in a solar greenhouse without a heating system during winter in northern China. But low temperatures under 8°C often happen at night in a solar greenhouse. So a heating system in a solar greenhouse is a crucial technology for agricultural fresh produce such as vegetables in winter in order to improve the inner environment. A new heating technique using a capillary tube mat exchanger was introduced to a solar greenhouse. Thermal characteristics and property of flow resistance were tested under 0.0306 kg/s, 0.0222 kg/s and 0.0139kg/s water flow rates and 20~50°C excess temperature in a laboratory. The diameter and wall thickness of the capillary tube was 4 mm and 1 mm. The length, width, and distance between neighboring capillary tubes were 2800 mm, 600 mm, and 20 mm. Function curves of heat flux and local resistance under different water flux were obtained. The influence of water flux could be ignored, but set position had a great influence on the results. The heat fluxes were 258~323 W/m² and 307~381 W/m² when sample capillary tube mat exchangers were set with vertical position and horizontal position under an excess temperature of 25~30°C. In order to test the feasibility of the capillary tube mat exchangers in a solar greenhouse, a low water temperature heating system using capillary tube mat exchangers was designed for a solar greenhouse with a 518.5m² covered area seated in Beijing Changping district. 120 m² capillary tube mat exchangers were installed along the back wall and side wall in the solar greenhouse. A biomass boiler supplied the 60°C heat water. Low 40°C water was supplied to the capillary tube mat exchangers using a water mixing valve. Contrast tests were conducted between two same structure solar greenhouses in winter during the year 2012 through 2013, during which one solar greenhouse with a heating system and the other without were monitored. Soil temperature at the 15cm depth and canopy temperature were measured every 10 minutes during the experiment in the two greenhouses. Average night canopy temperature and soil temperature at 15cm depth under ridge cultivation could be kept at 10°C and 15°C above while using 125 kg of straw biomass fuels every night. The average night canopy temperature, lowest temperature, and soil temperature at 15 cm depth under ridge cultivation during the experiment were 9.0°C, 6.5°C, and 5.7°C higher than compared to a solar greenhouse.

Key words: greenhouses, capillary tubes, heat exchangers, solar greenhouse, thermal characteristics, property of flow resistance

(责任编辑: 张俊芳)