

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.033

线聚焦型太阳能二氧化碳发生器性能研究

郭 泉<sup>1,2</sup> 张远巍<sup>1</sup> 冯志诚<sup>1</sup> 王 飞<sup>1</sup> 田 瑞<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古可再生能源重点实验室, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 研究了一种线聚焦型太阳能二氧化碳发生器。分别在跟踪及非跟踪工况下,在呼和浩特地区测试并分析了系统的集热与产气性能。确定了系统的最佳运行方式,提出了气损率和产气能力2个系统性能评价指标。测试结果表明,跟踪较非跟踪工况,反应器内腔空晒最高温度、闷晒最高水温、最高集热效率分别提升16.30%、12.44%、94.50%;系统最佳运行工况确定为跟踪式。在产气原料分解温度范围内,系统集热效率为31.80%;测试阶段系统气损率为4.50%;当太阳直接辐照度在650~850 W/m<sup>2</sup>范围内变化时,系统产气能力随太阳直接辐照度呈正相关变化。基于系统产气能力的变化规律,可计算不同规模线聚焦型太阳能二氧化碳发生器的具体结构参数。

**关键词:** 二氧化碳发生器; 线聚焦; 太阳能; 集热性能; 产气能力

**中图分类号:** TK513      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0285-10

Performance of Trough Solar-concentrating Carbon Dioxide Generator

GUO Xiao<sup>1,2</sup> ZHANG Yuanwei<sup>1</sup> FENG Zhicheng<sup>1</sup> WANG Fei<sup>1</sup> TIAN Rui<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China  
2. Inner Mongolia Renewable Energy Key Laboratory, Huhhot 010051, China)

**Abstract:** A new type of trough solar-concentrating carbon dioxide generator was designed. The heat collection and gas production performance of the generator was tested under the tracking and non-tracking conditions in Huhhot, and the changing rules of the reactor cavity stagnation temperature, integral water temperature and heat-collecting efficiency with the irradiance at the daylight opening were analyzed, the optimal operation mode of the system was determined and two system performance evaluation indexes of gas loss rate and gas production capacity were proposed. The test results showed that the determination coefficient of the fitting formulas were both greater than 0.998 after the calibration with two thermocouples, and the fitting function had high accuracy. During the test, the fitting curve equation was used to correct each test temperature value. The No.1 thermocouple tested the generator cavity temperature, which was installed in the center of the cavity. The No.2 thermocouple was installed close to the outer wall to test the temperature of the outer wall of the generator. Under the two conditions, the change rules of the system performance parameters were similar, but there were also features in common. The temperature of each test point and gas production capacity had positive correlation with the irradiance. The heat generation efficiency of the system was mainly affected by the initial temperature of the heat storage medium, and the higher the initial temperature of the heat storage medium was, the lower the heat-collecting efficiency of the system would be. When the temperature of the heat storage medium approached the limit temperature, the higher solar irradiance was needed to supply the system heat loss and then continue to enhance its heat storage. Under tracking and non-tracking conditions, the maximum stagnation temperatures of the reactor were 107℃ and 92℃, respectively. Compared with the non-tracking conditions, the maximum stagnation temperatures of the reactor cavity was increased by 16.30% under tracking conditions. Under the conditions of tracking and non-tracking, the maximum integral water temperatures of the reactor were up to 94℃ and 83.6℃ and the highest heat concentration efficiency were

收稿日期: 2018-03-16    修回日期: 2018-04-09  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51263013)、内蒙古自治区科技创新引导项目(2017)和内蒙古工业大学科学研究基金项目(X201708)  
**作者简介:** 郭泉(1987—),男,助教,主要从事太阳能利用研究,E-mail: guoxiao1196@163.com  
**通信作者:** 田瑞(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事传热传质强化和能源利用研究,E-mail: tianr@imut.edu.cn

38.90% and 20.00% , respectively. Compared with the non-tracking conditions, the maximum water temperature in the reactor cavity was increased by 12.44% and the maximum heat concentration efficiency of the system was increased by 94.50% under tracking condition. During the test period, the minimum water temperature in the reactor cavity was 62.4℃ , which was higher than the complete decomposition temperature of the reaction raw materials. Integral temperature of reactor was less influenced by ambient temperature. The best operation condition of the system was determined to be tracking model. The heat-collecting efficiency of the system was 31.80% within the gas generation temperature range , and the gas loss rate was 4.50% during the whole gas production process. When the solar direct irradiance was ranged from 650 W/m<sup>2</sup> to 850 W/m<sup>2</sup> , the gas generation capacity of the system showed a positive correlation with the solar direct irradiance lower than 700 W/m<sup>2</sup> , the gas production capacity gradually tended to be steady, and the gas loss approached the limit value, and the decomposition speed tended to be stable. The relationship between gas production capacity and solar direct irradiance was obtained. Based on the gas production capacity, the determination method of specific structural parameters of line focus solar carbon dioxide generator under the best mode of operation can be determined. The research result was of great significance for promoting the standardized application of the line focus solar carbon dioxide generator.

**Key words:** carbon dioxide generator; line focus; solar energy; performance of heat collection; gas production capacity

0 引言

传统农业生产过程中,主要以增施水肥、化肥及有机肥的方式提高土壤养分,进而实现增产的目的。CO<sub>2</sub>作为植物进行光合作用的关键原料,在农作物生长过程中必不可少,特别对温室大棚内农作物的生长具有重要的促进作用<sup>[1-4]</sup>。由于温室大棚内的CO<sub>2</sub>含量有限,均不足以达到增产目的,所以在农作物进行光合作用期间,借助二氧化碳发生器对其提供适量CO<sub>2</sub>,可在很大程度上提高作物产量。

国内外相关学者及机构在二氧化碳发生器的应用、工作原理、结构、运行性能及施肥规律等方面,做了诸多设计与研究<sup>[5-10]</sup>。但目前还未见将线聚焦集热原理应用于制造CO<sub>2</sub>气肥的报道。20世纪20年代,欧美、日本等国已开始推广并应用二氧化碳发生器,对温室大棚中的农作物增施CO<sub>2</sub>气肥,其中荷兰、日本发展速度较快。20世纪末,韩国已广泛采用了LPG燃烧式二氧化碳发生器,CO<sub>2</sub>浓度控制由传感器或时间实现。

太阳能具有储量巨大、清洁无污染等诸多优点,主要有光热和光电2种利用形式<sup>[11-14]</sup>。线聚焦集热是太阳能热利用的主要形式之一,可在不同应用场合提供不同的温度区段,具有很大的应用空间<sup>[15-18]</sup>。太阳能热利用效率受诸多因素影响,如环境温度、环境风速、积灰、太阳能资源、系统运行方式等<sup>[19-23]</sup>。太阳能聚光集热系统有跟踪及非跟踪2种运行方式<sup>[23-27]</sup>,跟踪运行可极大提高系统集热效率,而跟踪精度是衡量跟踪器性能的关键指标之一,高精度跟踪对提高系统有效性具有重要意义

义<sup>[27-28]</sup>。当前已存在多种形式的二氧化碳发生器,但均以消耗电能为代价进行产气,产气过程复杂且能耗大。而利用太阳能来生产CO<sub>2</sub>,是一种既节能又环保的产气途径。在一定温度范围内,太阳能二氧化碳发生器产气量随太阳辐照度呈正相关变化,故产气时段与光合作用时段具有较好的匹配性,可在很大程度上减小系统储气装置的容积,故具有很大的开发应用潜力。

本研究拟利用线聚焦集热原理生产CO<sub>2</sub>气肥,基于自主研制的线聚焦型太阳能二氧化碳发生器,对系统集热性能及产气能力进行测试。基于系统产气能力测试结果,提出线聚焦型太阳能二氧化碳发生器具体结构参数的计算方法。

1 理论计算与测试系统

1.1 理论计算

(1)产气性能

假设向二氧化碳发生器内投入1g NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>。NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>受热完全分解后,理论产CO<sub>2</sub>的比质量为m<sub>L</sub>。理论产气量计算式为

$$\text{NH}_4\text{HCO}_3 \xrightarrow{\text{加热}} \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow \quad (1)$$

通过化学反应式可知理论产CO<sub>2</sub>的比质量:m<sub>L</sub> = 44/79 = 0.557 g。

理论产CO<sub>2</sub>的比体积计算式为

$$v_L = \frac{m_L}{M} V_m \quad (2)$$

式中 v<sub>L</sub>——理论产CO<sub>2</sub>的比体积,mL/g  
M——气体摩尔质量,kg/mol  
V<sub>m</sub>——气体摩尔体积,其值为22.4 L/mol

计算得  $v_L = 283.56 \text{ mL/g}$ 。

实际产  $\text{CO}_2$  的比体积计算式为

$$v_s = \frac{V_s}{m_s} \quad (3)$$

式中  $v_s$ ——实际产  $\text{CO}_2$  的比体积,  $\text{mL/g}$

$V_s$ ——实际产气量,  $\text{mL}$

$m_s$ —— $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  的实际消耗量,  $\text{g}$

由于测试过程中以排水法测量排气量,故计算时实际产气量即为排水量。

气损率为产气损失量占理论产气量的百分比。气损率一方面反映了系统对反应原料的有效利用程度,另一方面可提高系统中  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  投入量的估算精度。气损率计算式为

$$\delta = \left(1 - \frac{v_s}{v_L}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中  $\delta$ ——气损率, %

产气能力为产气原料吸收单位太阳辐射量时的产气量。产气能力反映了系统的整体生产能力,基于产气能力可设计出适合不同规格温室大棚的线聚焦型太阳能二氧化碳发生器。产气能力计算式为

$$\sigma = \frac{V_s}{E\eta} \quad (5)$$

式中  $\sigma$ ——产气能力,  $\text{mL/MJ}$

$E$ ——测试时段采光口接收的太阳总辐照量,  $\text{MJ}$

$\eta$ ——集热器平均集热效率, %

## (2) 集热效率

经过聚光器采光口的总能量是影响系统产气量的关键因素之一,总能量  $E$  计算式为

$$E = A \sum I \quad (6)$$

式中  $I$ ——太阳辐照度,  $\text{W/m}^2$

$A$ ——采光口面积,  $\text{m}^2$

平均集热效率反映了系统对太阳能的利用率,不同的应用场合对集热效率的需求各不相同,故应基于实际情况,对集热器结构进行科学化设计。线聚焦集热器的平均集热效率计算式为

$$\eta = \frac{mc_p(T_2 - T_1)}{IA\Delta t} \times 100\% \quad (7)$$

式中  $c_p$ ——水的定压比热容,其值为  $4200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

$T_2$ ——测试结束时刻反应器腔体内部水温,  $^{\circ}\text{C}$

$T_1$ ——测试开始时刻反应器腔体内部水温,  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta t$ ——测试时长,  $\text{s}$

## 1.2 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器

该装置以聚光形式提高反应器外壁面的能流密

度,利用反应器所聚集的能量分解产气原料。测试用产气原料为  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,由天津市北联精细化学品开发有限公司生产,为无色柱状结晶或白色坚硬块状物,可溶于水,化学性质不稳定,  $36^{\circ}\text{C}$  以上分解为二氧化碳、氨和水,热至  $60^{\circ}\text{C}$  时可完全分解。

如图 1 所示,线聚焦型二氧化碳发生器由聚光器、反应器、超白减反玻璃、气体缓冲腔 4 部分组成。聚光器由抛物线型反射镜面、支撑体构成,为一体化结构,反射镜面材料为 10 K 镜面不锈钢,反射率为 0.7。当抛物线对称轴为  $y$  轴、顶点为坐标原点时,聚光器母线方程为  $y^2 = 96x$ ,理论焦距为  $47 \text{ mm}$ 。聚光镜开口宽  $300 \text{ mm}$ ,长  $500 \text{ mm}$ ,采光口面积为  $0.150 \text{ m}^2$ ,几何聚光比为 4.8,低聚光比可获得适宜的反应器内部温度区间。考虑反应器表面光斑均匀性及聚光槽深度,将反应器安装中心设计于对称轴,且距原点  $75 \text{ mm}$  处,相对焦点上移  $28 \text{ mm}$ 。聚光器为反应原料提供分解所需的全部热量,节能效果明显;反应器由填料端盖、吸热体、滤气网、滤水网、排污阀、反应料均布挡板 6 部分组成。填料端盖与吸热体以螺纹压紧形式密封,可实现灵活启闭,开启时在填料口处添加产气原料,同时填料端盖中心处开有外径为  $10 \text{ mm}$  的混合气体一次出口。吸热体作用为高效吸收高能流密度的太阳辐射能,由 304 不锈钢管加工而成,不锈钢管外径  $63 \text{ mm}$ 、壁厚  $1.2 \text{ mm}$ 、长  $400 \text{ mm}$ ,其外表面填涂选择性吸收涂层(酞菁绿),颜料成分为  $\text{Fe}_3\text{CuO}_5$ ,吸收率为 0.91,发射率为 0.15。滤气网为圆柱形,设置在反应器中心处,一侧距混合气体一次出口  $20 \text{ mm}$ ,另一侧连接反应器底部,为可拆卸式螺纹连接,由外径  $15 \text{ mm}$ 、长  $380 \text{ mm}$ 、厚  $0.8 \text{ mm}$  的不锈钢圆柱形滤网加工而成,滤网筛孔尺寸为  $0.09 \text{ mm}$ ,标准目数为 170 目,滤气网作用为截留反应原料、使气料分离,及时排出一气体。滤水网靠近反应器底部,距离底部  $20 \text{ mm}$ ,为圆环状,外圆固定式连接反应器内壁,内圆可拆卸式连接滤气网,其间采用软硅胶圈密封,其材料规格同滤气网,滤水网作用为截留反应原料,使反应废液滤出,即时从反应原料中分离出液态水,避免反应原料结渣。排污阀设置于反应器底部最低处,用于定时排除发生器内部液态水。反应料均布挡板设置在反应器下壁面处,型线为圆弧,开口宽度  $30 \text{ mm}$ ,与反应器壁面固定式连接,材料规格同滤气网,其作用为均匀分布反应器内部反应原料,防止反应原料因重力作用而产生堆积;超白减反玻璃设置在聚光器开口处,长  $500 \text{ mm}$ ,宽  $300 \text{ mm}$ ,厚  $5 \text{ mm}$ ,与聚光器可拆卸式连接,透射率为 0.92,其主要作用为透光、保温;气体缓冲腔由 2 个不锈钢圆柱体组成,外圆柱直

径 70 mm,内圆柱直径 60 mm,圆柱高 115 mm。底部和顶部全密封,侧壁下部开有内径为 10 mm 的进气口,连接混合气体一次出口。侧壁上部开有内径为 10 mm 的混合气体二次出口,一、二次出口相对布置。中间腔体用于缓冲一次气体,使可逆反应尽可能在反应器腔体内部进行,当少量水汽耗尽后,通气管道内将不发生逆反应,进而避免管路结渣,防止堵塞,气体缓冲腔需定期通水熔渣。

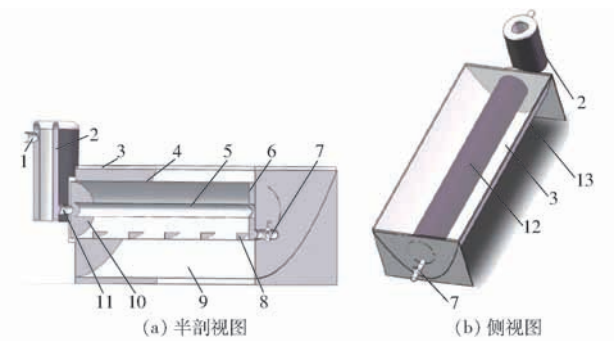


图 1 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器结构图

Fig. 1 Structure diagrams of line focus type solar carbon dioxide generator

1. 混合气体二次出口 2. 气体缓冲腔 3. 超白减反玻璃 4. 吸热体 5. 滤气网 6. 滤水网 7. 排污口 8. 反应料均布挡板 9. 反射镜面 10. 填料端盖 11. 混合气体一次出口 12. 反应器 13. 聚光器

1.3 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器性能测试系统

如图 2 所示,测试系统由产气装置、滤气装置及集气测量装置组成。测试时段将线聚焦型太阳能二氧化碳发生器固定在太阳双轴自动跟踪平台,可在跟踪及非跟踪 2 种工况下,研究系统集成热性能,并确定最佳运行方式。太阳自动跟踪平台逐日平面上安装太阳辐射监测系统,该系统可同步监测太阳辐照度及相关气象参数的变化趋势。反应器腔体轴向中

部中心及中部下侧外边壁分别布置 2 只 K 型点状热电偶,配套 TP700 型数据记录仪,用于监测反应器腔体内部及壁面温度变化趋势。为完全滤除混合气体中的氨气,该系统设置 2 级过滤装置。过滤装置由滤气箱和连接通道组成,经由补水口向一级滤气箱内注水至 90% 位置,进气口通至液面以下,用于一次滤气。出气口在液面以上,将过滤后较纯净的 CO<sub>2</sub> 气体输送至二级滤气集气一体箱,二级滤气以压溶形式进一步提高 CO<sub>2</sub> 纯度。集气测量装置由二级滤气集气一体箱、测试量筒组成,产气量测试用排水集气法,经由补水口向二级滤气集气一体箱内注满水,排水口通入液面以下至箱底,进气口设置于箱口处,由进气口通入较纯净的 CO<sub>2</sub> 气体,气体将水压入排水管道后排出至量筒内,再经量筒直接读出产气量。

2 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器性能测试

2.1 试验设备与测试仪器

本研究所涉及试验设备包括 1 套太阳双轴自动跟踪平台(跟踪精度为 0.1°)、1 套线聚焦型太阳能二氧化碳发生器(反应器吸热体表面积为 0.079 m<sup>2</sup>)、2 个滤气箱、1 个量筒(量程为 2 000 mL、改装后读数精度为 1 mL)、2 只 K 型点状热电偶、1 台电子天平(精度 0.01 g)。

本研究所用测试仪器包括 1 套太阳辐射监测系统、1 台 TP700 型数据记录仪和 1 只一等标准水银温度计。整个太阳辐射监测系统由传感器支架、内置 GPS 的 Solys2 型太阳跟踪器、荷兰 KIPPZONEN 型太阳辐射(直接辐射、散射辐射、总辐射、紫外辐射、长波辐射)监测仪、各类传感器(温度、湿度、风速及风向传感器)、美国 SCI 数据记录仪组成。

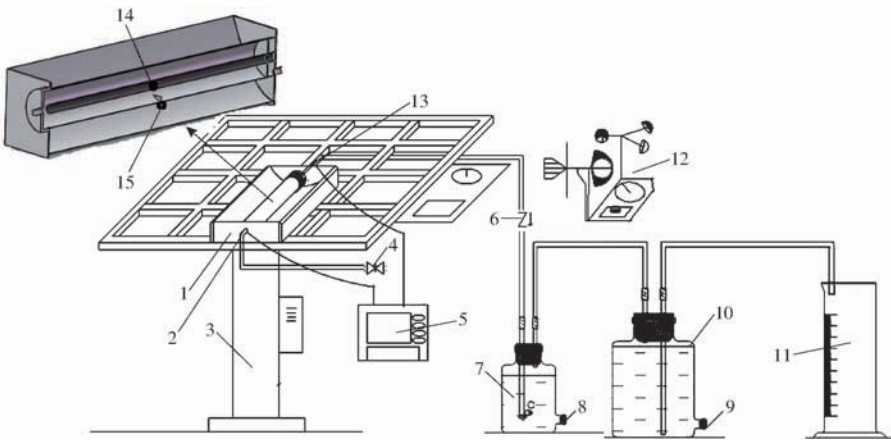


图 2 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器性能测试系统图

Fig. 2 Performance test system diagram of line focus type solar carbon dioxide generator

1. 线聚焦型太阳能二氧化碳发生器 2. 排污口 3. 太阳自动跟踪平台 4. 排污阀 5. TP700 型数据记录仪 6. 单向阀 7. 一级滤气箱 8. 9. 补水口 10. 二级滤气、集气一体箱 11. 量筒 12. 太阳辐射监测系统 13. 混合气体一次出口 14. 反应器腔体内部热电偶位置 15. 反应器壁面热电偶位置

Solys2 型太阳跟踪器可实现全天 360°全自动跟踪观测,跟踪精度小于 0.1°,直接辐射表灵敏度为 7 ~ 14  $\mu\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ ,响应时间小于 5 s,倾斜响应小于 0.2%,零度偏移小于 7  $\text{W}/\text{m}^2$ ,工作温度为 -40 ~ 80℃,非稳定性小于 0.5%,非线性小于 0.2%。SCI 数据记录仪以 CR3000 型数据采集器为核心构建,工作电压为 10 ~ 16 V,内部数据滚动存储;TP700 型数据记录仪用于存储系统各测点温度数据,TP700 型数据记录仪配置丰富,可接收多种类型的直流电流、电压和电阻信号,测量、显示基本误差为  $\pm 0.2\%$ ;一等标准水银温度计由北京玻璃研究所生产,测量范围为 0 ~ 150℃,最小分度值为 0.1℃。

2.2 测试方案

(1)在一定温度范围内标定 K 型点状热电偶,使标定后各热电偶的测量误差小于 0.1℃,由于热电偶线性特性不够理想,故在测试温度范围内选取较小的标定区间,选取适宜温度间隔,以保证较多的标定点,标定标准温度计选取一级标准水银温度计。

(2)在跟踪及非跟踪工况下进行空晒试验,以分析空晒时反应器各测温点温度随太阳辐照度的变化趋势。

(3)以水作为集热工质,在跟踪及非跟踪工况下进行闷晒试验,以分析闷晒时反应器各测温点温度及集热效率随太阳辐照度的变化趋势。系统闷晒过程无蓄热工质转移,处于稳态工况。

(4)基于空晒及闷晒试验测试结果确定系统最佳运行方式,在最佳运行方式下,测试系统产气性能,分析产气量随累计太阳辐照量的变化规律,进而确定系统产气能力。

2.3 试验流程

本研究在实验室太阳双轴自动跟踪平台上,进行了系统集热性能与产气性能试验,试验地区为内蒙古呼和浩特市,试验时间为 2017 年 4 月 20 日—5 月 15 日,试验时段室外平均风速均小于 4 m/s,天气晴朗。试验流程如下:

(1)采用恒温水浴在 25 ~ 100℃范围内标定测

试用热电偶,适宜间隔下取 14 个标定点。标定时段关闭测试室门窗,以减小环境干扰。

(2)空晒试验。测试前,将 TP700 型多路数据记录仪与太阳辐射监测系统的时钟调整一致,密封反应器进出口,并做保温,分别在跟踪与非跟踪工况下进行空晒性能测试。测试于发生器无任何阴影遮挡时开始记录数据,TP700 型多路数据采集仪每分钟记录 2 次数据,太阳辐射监测系统每分钟记录 1 次数据,数据分析过程各监测数据取 30 min 平均值。跟踪工况时,太阳始终直射采光口。非跟踪工况时,将太阳双轴自动跟踪平台手动调至正南且倾斜 45°。重复测量 3 次,取平均值。

(3)闷晒试验。测试流程同空晒试验。在反应器腔体内注满水,注水总质量 1.20 kg,随后密封反应器进出口,分别于跟踪与非跟踪工况下进行测试。

(4)产气试验。连接过滤装置和集气测量装置,采用打压泵以打压形式检测系统密封性,打压泵压力表显示 0.40 MPa 后可稳定 30 min,即认为管路密封及承压性良好。随后,将产气原料填入反应器腔体并称质量,在最佳运行工况下,间隔 30 min 记录量筒读数,水容积即为产气量。测试结束后,再利用电子天平称量反应器质量,计算反应前后质量差,即为产气原料消耗量。同时在反应器外壁安装 K 型点状热电偶,监测腔体温度。重复测量 3 次,取平均值。

3 结果与分析

3.1 热电偶标定结果

图 3 为热电偶显示温度与实际温度的关系曲线,通过曲线拟合可得,1 号热电偶标定拟合曲线方程为  $y = 0.938\ 3x + 3.115$ ,  $R^2 = 0.999$ 。2 号热电偶标定拟合曲线方程为  $y = 0.939\ 7x + 3.096$ ,  $R^2 = 0.999$ ,2 只热电偶拟合曲线决定系数均大于 0.998,故拟合函数精度较高。

3.2 系统集热性能分析

3.2.1 空晒试验

跟踪测试时段,平均风速 2.17 m/s。非跟踪测

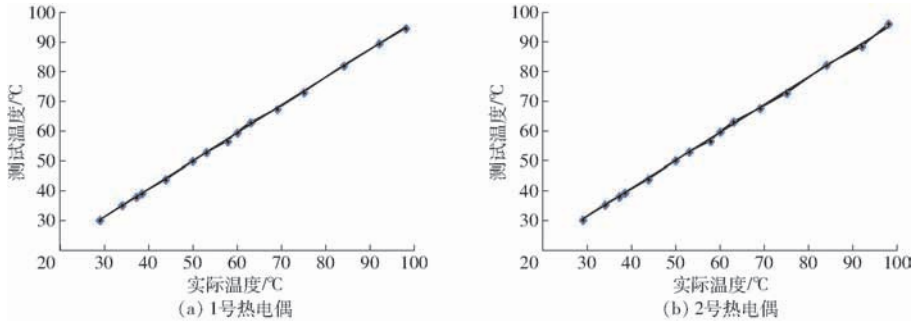


图3 热电偶标定拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of thermocouple calibration

试时段,平均风速 2.38 m/s。满足空晒性能测试要求(风速小于 4 m/s)。

### (1) 跟踪工况

测试时间为 4 月 25 日,由图 4 可知,反应器外壁温度始终略低于其内腔温度,各测温点温度波动范围小,由于空气比热容很小,故跟踪空晒时,各测温点温度对太阳辐射很敏感。测试开始时刻,温度瞬时提升幅度很大,各测温点温度快速提升至 96℃,故系统具有较高的能量接收速率。但随太阳直接辐照度变化而产生的温度波动较小,故系统具有较好的温度保持能力。当太阳直接辐照度高于 865 W/m<sup>2</sup>时,反应器腔体内温度在 102~107℃ 范围内波动变化,波动幅度为 5%;反应器外壁温度在 96~99.5℃ 范围内波动变化,波动幅度为 3.60%;当太阳直接辐照度从 865 W/m<sup>2</sup> 直线降低为 738 W/m<sup>2</sup> 时,反应器内腔温度从 102℃ 降低至 91℃,降幅为 10.78%,反应器外壁温度从 96℃ 降低至 86℃,降幅为 10.42%;空晒最高温度为 107℃。测试期间,环境温度在 10.5~17℃ 间波动变化,与反应器内腔各测点温度变化趋势相反,故环境温度对其影响较小。受装置保温措施影响,反应器外壁温度对环境温度变化较敏感。

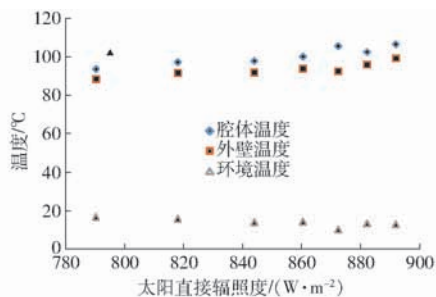


图4 跟踪工况下各测温点空晒温度随太阳直接辐照度的变化趋势

Fig.4 Changing trend of measurement point of water stagnation temperature with irradiance under tracking condition

### (2) 非跟踪工况

测试时间为 4 月 28 日,09:45—12:45 为太阳总辐照度递增时段,12:45—16:45 为太阳总辐照度递减时段。由图 5 可知:反应器外壁温度始终略低于其内腔温度,14:15—15:45 时段,太阳总辐照度变化速率最大,反应器外壁和内腔间温差最小,测试时段,温差于 1.9~9.1℃ 区间变化;在太阳总辐照度递增和递减时段,反应器内腔及外壁温度均随太阳总辐照度呈正相关变化,但递减速率明显小于递增速率。测试开始时刻,各测温点温度瞬时提升幅度远小于跟踪工况,将各测温点温度快速提升至 41℃,故系统能量接收速率远小于跟踪工况。随太阳总辐照度变化而产生的温度波动远大于跟踪工

况,故系统温度保持能力相对较差;当太阳总辐照度为 932 W/m<sup>2</sup> 时,反应器内腔空晒温度为 92℃,达到最高;递增时段,太阳总辐照度由 671 W/m<sup>2</sup> 升高至 932 W/m<sup>2</sup>,反应器内腔温度从 49℃ 升高至 92℃,增幅为 87.76%。反应器外壁温度从 41℃ 升高至 87℃,增幅为 112.20%。递减时段,太阳总辐照度由 932 W/m<sup>2</sup> 迅速降低至 441 W/m<sup>2</sup>,反应器内腔温度从 92℃ 降低至 45℃,降幅为 51.09%。反应器外壁温度从 86℃ 降低至 41℃,降幅为 52.33%;环境温度在 15.3~24.2℃ 间波动变化,总体而言,环境温度与反应器各测温点温度变化趋势相反,故环境温度对反应器空晒温度影响较小。

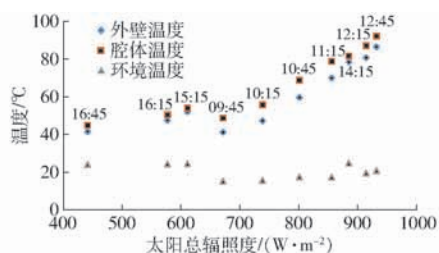


图5 非跟踪工况下各测温点空晒温度随太阳总辐照度的变化趋势

Fig.5 Changing trend of measurement point of water stagnation temperature with irradiance under non-tracking condition

综上所述,跟踪较非跟踪工况,反应器内腔空晒最高温度提高 16.30%;能量接收速率和温度保持能力均远大于非跟踪工况;环境温度对反应器空晒性能影响较小。

### 3.2.2 闷晒试验

跟踪测试时段,平均风速 2.63 m/s。非跟踪测试时段,平均风速 2.47 m/s。满足闷晒性能测试要求(风速小于 4 m/s)。

#### (1) 跟踪工况

测试时间为 4 月 26 日,图 6 为线聚焦型太阳能二氧化碳发生器跟踪工况下,闷晒试验中反应器各测温点温度随太阳直接辐照度的变化趋势。9:50—11:50 为太阳直接辐照度递增时段,11:50—17:20 为太阳直接辐照度递减时段。由图 6 可知测试时段太阳直接辐照度先增后降,除 11:50—13:50 时段外,反应器各测温点温度与太阳直接辐照度的变化趋势基本一致,均呈正相关趋势变化。因水的比热容远大于空气,故水的蓄热能力远大于空气,且反应器壁面存在一定热阻,太阳直接辐照度变化幅度相对较小,故各测温点温度随太阳直接辐照度的变化在时间上存在延迟现象。11:50—13:50 时段,各测温点温度随太阳直接辐照度呈负相关变化,将图中各对应点的连线命名为温度延迟变化线,其所对应

时长可表征系统对太阳直接辐照度变化的响应敏感度,由图 6 可知,最高水温变化滞后最大直接辐照度 2 h。9:50—13:50 为各测温点温度递增时段,将图中各对应点的连线命名为系统能量接收线,其斜率可表征系统接收太阳辐射能的速率。13:50—17:20 为各测温点温度递减时段,将图中各对应点连线命名为系统温度保持线,其斜率可表征系统维持腔体内温度的能力。各测温点温度递增时段,11:50 时太阳直接辐照度达到最大值 898 W/m<sup>2</sup>,反应器内腔水温从 13℃ 快速升高至 94℃。反应器外壁温度从 12.5℃ 快速升高至 92.5℃。最大温差为 1.5℃。13:50 时内腔水温与壁面温度分别达到最大值 94.0、92.5℃,对应太阳直接辐照度为 875 W/m<sup>2</sup>;各测温点温度递减时段,太阳直接辐照度从 875 W/m<sup>2</sup> 迅速降低至 673 W/m<sup>2</sup>,当太阳直接辐照度低于 875 W/m<sup>2</sup> 时,已不能使内腔温度继续升高,系统吸热量小于热损值,此时外壁与内腔温差由负值变为正值,反应器内腔温度从 94℃ 缓慢降低至 71℃,降低 24.47%。反应器外壁温度从 92℃ 缓慢降低至 69℃,降低 25.00%;测试时段,环境温度在 12~18℃ 之间波动变化,总体而言,环境温度与反应器各测温点温度变化趋势相反,故环境温度对反应器内闷晒温度影响较小。

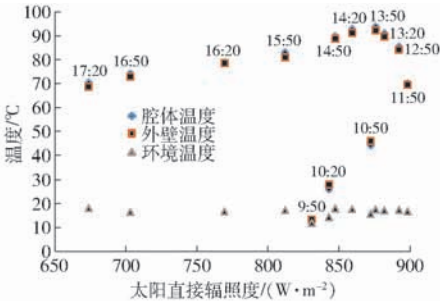


图 6 跟踪工况下各测温点闷晒温度随太阳直接辐照度的变化趋势

Fig.6 Changing trend of measurement point of air stagnation temperature with irradiance under tracking condition

由表 1 可知,不同温度区段内,系统集热效率随反应器内腔水温呈负相关变化,当初始水温与平均太阳直接辐照度分别为 26.1℃、872 W/m<sup>2</sup> 时,系统集热效率可达 38.90%,当初始水温与平均太阳直接辐照度分别为 94.1℃、875 W/m<sup>2</sup> 时,系统集热效率仅为 6.10%,当蓄热工质温度由 26.1℃ 升高为 94.1℃ 时,系统集热效率下降 84.31%。

系统能量接收线与系统温度保持线夹角为热性能角,延迟线长度对应时长为温度响应敏感度。以下将综合采用热性能角、温度响应敏感度、集热效率来确定系统的最佳运行方式。

(2) 非跟踪工况

测试时间为 4 月 27 日,图 7 为线聚焦型太阳能

表 1 跟踪工况下系统集热效率  
Tab.1 Heat-collecting efficiency of system under tracking condition

| 序号 | 初始水温<br>$T_1/℃$ | 结束水温<br>$T_2/℃$ | 平均太阳直接辐照度<br>$I/(W·m^{-2})$ | 集热效率<br>$\eta/\%$ |
|----|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| 1  | 26.1            | 44.3            | 872                         | 38.90             |
| 2  | 44.3            | 59.3            | 870                         | 31.80             |
| 3  | 59.3            | 70.3            | 898                         | 22.90             |
| 4  | 70.3            | 79.2            | 894                         | 18.60             |
| 5  | 79.2            | 85.7            | 892                         | 13.60             |
| 6  | 85.7            | 91.2            | 881                         | 11.70             |
| 7  | 91.2            | 94.1            | 875                         | 6.10              |

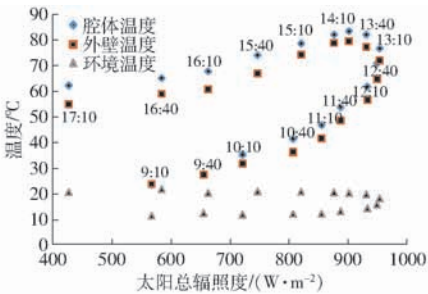


图 7 非跟踪工况下各测温点闷晒温度随太阳总辐照度的变化趋势

Fig.7 Changing trend of measurement point of air stagnation temperature with irradiance under non-tracking condition

二氧化碳发生器非跟踪工况下,闷晒试验中系统各测温点温度随太阳总辐照度的变化趋势,9:10—13:10 为太阳总辐照度递增时段,13:10—17:10 为太阳总辐照度递减时段。由图 7 可知测试时段,采光口平面处太阳总辐照度先增后降,除温度延迟时段外,发生器各测温点温度与太阳总辐照度的变化趋势基本一致,13:10—14:10 为温度延迟时段,最高水温滞后最大太阳总辐照度 1 h,13:10 时太阳总辐照度达到最大值 953 W/m<sup>2</sup>。各测温点温度递增时段,反应器内腔水温从 23.7℃ 快速升高至 83.6℃,升高 255.70%。反应器外壁温度从 24.1℃ 快速升高至 79.7℃,升高 230.70%。最大温差为 3.9℃。14:10 时,内腔水温与壁面温度分别达到最高值 83.6、79.7℃,对应太阳总辐照度为 901 W/m<sup>2</sup>,滞后最高太阳总辐照度 1 h;各测温点温度递减时段,太阳总辐照度从 901 W/m<sup>2</sup> 迅速降低至 426 W/m<sup>2</sup>,当太阳总辐照度低于 901 W/m<sup>2</sup> 时,外壁与内腔温差由负值变为正值,反应器内腔温度从 83.6℃ 缓慢降低至 62.4℃,降低 25.36%。反应器外壁温度从 79.7℃ 缓慢降低至 55.1℃,降低 30.87%。测试时段,环境温度在 12~21℃ 之间波动变化,总体而言,环境温度与反应器各测温点温度变化趋势相反,故环境温度对反应器闷晒温度影响较小。

综上所述,跟踪较非跟踪工况,反应器内腔闷晒

最高温度提高 12.44% ;综合图 6、7 可知,跟踪工况下,系统热性能角较非跟踪工况小,温度响应敏感度较非跟踪工况大。

由表 2 可知系统集热效率随反应器内腔水温呈负相关变化,当初始水温与太阳总辐照度分别为 28.0℃、721 W/m<sup>2</sup> 时,系统集热效率为 20.00%,当初始水温与太阳总辐照度分别为 82.2℃、901 W/m<sup>2</sup> 时,系统集热效率仅为 2.8%,当初始水温由 28.0℃ 升高为 82.2℃ 时,系统集热效率下降 86.0%。

表 2 非跟踪工况下系统集热效率

Tab.2 Heat-collecting efficiency of system under non-tracking condition

| 序号 | 初始水温<br>$T_1/℃$ | 结束水温<br>$T_2/℃$ | 平均太阳总辐照度<br>$I/(W\cdot m^{-2})$ | 集热效率<br>$\eta/\%$ |
|----|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------|
| 1  | 28.0            | 35.4            | 721                             | 20.00             |
| 2  | 61.9            | 71.0            | 949                             | 18.00             |
| 3  | 71.0            | 76.8            | 953                             | 11.40             |
| 4  | 76.8            | 82.2            | 931                             | 10.70             |
| 5  | 82.2            | 83.6            | 901                             | 2.80              |

综上,跟踪较非跟踪工况,系统最高集热效率提高 94.50%。

3.2.3 结果分析

太阳辐照度对各测温点温度有决定性影响,受反应器吸热体壁厚热阻、蓄热工质蓄热能力及系统运行方式的影响,系统各测温点温度、温度跟踪特性、传热过程、集热效率的变化均存在一定特点。吸热体热阻是反应器外壁和内腔存在温差的决定因素;测温点温度变化对太阳辐照度的跟踪存在延迟现象,延迟时长由蓄热工质的蓄热能力、吸热体热阻、系统运行方式决定,系统以水为闷晒工质,壁厚一定,跟踪运行时,响应敏感度较非跟踪工况大;系统能量接收线及温度保持线斜率,主要受工质蓄热能力和系统运行方式影响,跟踪方式使得太阳光线始终直射采光口,系统对能量的接收能力相对较大,系统能量接收线斜率较非跟踪工况大,故温度上升速度相对较快。而系统温度保持线斜率较非跟踪工况小,故系统的能量保持能力强。所以系统以水为闷晒工质,跟踪运行时,热性能角较非跟踪工况大;系统集热效率主要受反应器内储热工质初始温度及运行方式的影响,一定温度范围内,跟踪方式更利于提升系统集热效率。当反应器腔体内蓄热工质为空气时,其比热容很小,单位质量空气的温度升高 1.0℃ 仅需很少的热量,故其外壁温度始终略低于内腔温度。当反应器腔体内蓄热工质为水时,其比热较大,单位质量的水温度升高 1.0℃ 需较多热量,随测试时间延长,反应器内腔储热工质的储热量逐渐

增大,对太阳辐照度的跟踪出现延迟,使得腔体内温度缓慢升高。随内腔温度的升高,温升速度将逐渐降低,部分热量被耗散,使得外壁与内腔温差不断减小,当达到动态平衡时,内腔和外壁温度达到相等。当太阳辐照度降低时,内腔中的高比热容储热工质向外壁的传热量将大于其所接收的热量,将导致外壁温度高于内腔温度,故随着腔体内工质蓄热能力的增大,腔体内部日最高温度会大幅降低。原料 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 分解过程会吸收大量热量,较高集热效率可将内腔温度维持在适宜范围。系统温度对太阳辐照度的跟踪特性,可保证系统产气量有效追踪植物光合作用过程。

综上,跟踪工况下,系统热性能角较固定式大,热量接收速率大、热损失率小。系统响应敏感度较固定式小,可促进系统产气速率趋于平稳。同等天气条件下,集热效率较固定式大。故综合考虑系统全生命周期经济性 & 运行性能,跟踪方式更利于系统高效运行。

3.3 产气性能分析

产气性能测试过程运行方式选为跟踪式,产气时段内腔温度在 45~60℃ 范围内变化。根据表 1,系统集热效率取为 31.80%。测试时段,环境平均风速为 3.13 m/s。

由图 8 可知,产气量对太阳直接辐照量具有较好的跟随性。测试前反应器及 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 的总质量为 1 744.2 g,测试结束后反应器及 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 的总质量为 1 559.6 g,NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 的实际消耗量为 184.6 g,测试时段实际总产气量为 51 290 mL,由式(3)计算可得,实际产 CO<sub>2</sub> 的比体积为 277.84 mL/g,实际值较理论值低 5.72 mL/g。由式(4)计算可知,整个产气过程的气损率为 4.50%。造成气损的主要原因为:测试当天太阳直接辐照度具有较大波动,在太阳直接辐照度降低时段,采光口在单位时长内所接收的总太阳直接辐照量减少,同时存在热损失,使得单位时长内,聚光能量经壁面热传导后,到达反应器腔体内的总量减少。故 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 的分解速度减慢,单位时长内的产气量明显减少,反应器内部压力也随之降低,一次气体出口处混合气体流速减慢,混合气体在缓冲腔中的流通时间增长,而缓冲腔体中温度明显低于反应器内腔温度,故混合气体将在缓冲腔体中发生轻微逆反应,在缓冲腔内壁产生逆反应物,最终导致产气量偏低。气损在太阳直接辐照度降低阶段均会发生,且气损量随太阳直接辐照量呈负相关变化。试验期间平均产气能力为 47.623 L/MJ。

在考虑系统集热效率的基础上,按式(5)及测试结果,可计算出不同太阳直接辐照度下的系统产

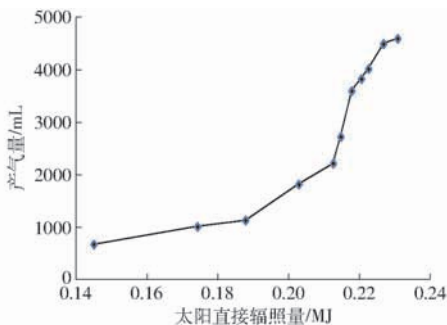


图8 跟踪工况下系统30 min产气量随太阳直接辐照量的变化趋势

Fig. 8 Changing trend of system gas production with direct irradiation under tracking condition in 30 min

气能力,由图9可知,当太阳直接辐照度在650~850 W/m<sup>2</sup>范围内变化时,系统产气能力随太阳直接辐照度呈正相关变化。太阳直接辐照度越低,反应器腔体在单位时间内所接收的总能量越少,系统所产生的气损量越大。随着分解反应的持续进行,反应器内腔蓄热量将不断减少,分解温度也随之降低,输气管路中的气流速度也不断减小,逆反应程度加剧,进而导致产气能力持续衰减,当太阳直接辐照度低于700 W/m<sup>2</sup>时,产气能力逐渐趋于平稳,气损值接近极限,产气速度趋于平稳。

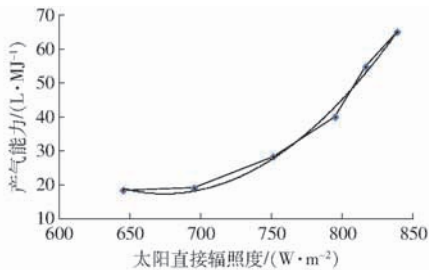


图9 跟踪工况下产气能力随太阳直接辐照度的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of gas generation capacity along with solar direct irradiance under tracking condition

如图9所示,对趋势线进行拟合后,可得产气能力随太阳直接辐照度的变化关系,其函数关系式为

$$y = 0.0018x^2 - 2.3998x + 826.63 \quad (R^2 = 0.993)$$

式中  $y$ ——产气能力, L/MJ  
 $x$ ——测试时段的平均太阳直接辐照度, W/m<sup>2</sup>

综上所述,由于跟踪工况可确保太阳光线时刻直射聚光器采光面,故采光口处可持续接收最大太

阳直接辐照量,当系统在一定太阳直接辐照度区间跟踪运行时,线聚焦型太阳能二氧化碳发生器在等长时段,所获得的太阳辐射能随时间波动较小,可保证系统稳定持续产气,实现最大限度利用太阳辐射能的目的。同时,跟踪工况下,系统热性能角较小,响应敏感度大,集热效率高,综合性能较优。故系统以跟踪方式运行时,能较好维持大棚与CO<sub>2</sub>的供求关系。不同农作物在不同太阳直接辐照度下进行光合作用时,所需CO<sub>2</sub>的量各不相同,该量可以通过相关资料经查询而获知,故一定规模塑料大棚对CO<sub>2</sub>需求量为已知量。根据式(8)可分别确定不同太阳直接辐照度下的产气能力,结合不同地区太阳能资源分布规律,可确定出系统采光口面积、反应器容积、各级滤气箱规格等关键参数,最后可依据聚光比来确定系统各结构的具体尺寸比。

线聚焦型太阳能二氧化碳发生器产气能源仅为太阳能,产气后所得氨水能以水肥方式进行循环再利用,系统在其全生命周期内具有较好的节能环保及经济性优势。

4 结论

(1)跟踪及非跟踪工况下,反应器空晒最高温度分别为107、92℃,跟踪较非跟踪工况,反应器内腔空晒最高温度提高16.30%。

(2)跟踪及非跟踪工况下,反应器闷晒水温最高可达94、83.6℃,最高集热效率分别为38.90%、20.00%。跟踪较非跟踪工况,反应器内腔最高水温提升12.44%,系统最高集热效率提升94.50%。测试时段反应器内腔最低水温为62.4℃,处于反应原料完全分解所需温度之上。

(3)系统最佳运行工况确定为跟踪式,产气温度范围内系统集热效率为31.80%;整个产气过程的系统气损率为4.50%。当太阳直接辐照度处于650~850 W/m<sup>2</sup>范围内时,系统产气能力随太阳直接辐照度呈正相关变化。当太阳直接辐照度低于700 W/m<sup>2</sup>时,产气能力逐渐趋于平稳,气损接近极限值,分解速度趋于平稳。

(4)线聚焦型太阳能二氧化碳发生器具节能环保及经济性优势,系统产气能力对农作物的光合作用强度具有较好的跟随性。

参 考 文 献

1 NIKHADE D M, BHOPLE R S. Constraints in adoption of farm innovations[J]. Rural India, 1989, 52(10): 45-94.  
2 王忠,蔡恒,高煌珠,等. CO<sub>2</sub> 富集对黄瓜的增产效应及原因分析[J]. 江苏农学院学报, 1993, 14(2): 37-44.  
WANG Zhong, CAI Heng, GAO Huangzhu, et al. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on cucumber yield and the cause analysis[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1993, 14(2): 37-44. (in Chinese)  
3 SLACK G, HAND D W. Cucumber crop responses to CO<sub>2</sub> enrichment[J]. Acta Horticulturae, 1984, 156: 177-185.

- 4 李素峰. 二氧化碳气体施肥技术[J]. 西北农业, 2012, 15(3): 23-26.  
LI Sufeng. Carbon dioxide gas fertilization technology[J]. Northwest Agriculture, 2012, 15(3): 23-26. (in Chinese)
- 5 于海业, 马成林, 陈晓光. 发达国家温室设施自动化研究的现状[J]. 农业工程学报, 1997, 13(6): 253-257.  
YU Haiye, MA Chenglin, CHEN Xiaoguang. Current situations of greenhouse automation in developed countries [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(6): 253-257. (in Chinese)
- 6 李兆君, 刘元旺. 一种日光温室二氧化碳发生器: 201410408886[P]. 2014-12-14.
- 7 张淑娟, 王双喜, 刘淑珍. 自压平衡式 CO<sub>2</sub> 发生器的设计与应用[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 13-14.  
ZHANG Shujuan, WANG Shuangxi, LIU Shuzhen. Design and application of pressure balance CO<sub>2</sub> generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 13-14. (in Chinese)
- 8 马健. 双向排风燃气式二氧化碳发生器[J]. 新农业, 2009, 4(2): 59-60.  
MA Jian. Carbon dioxide generator is bidirectional formula exhaust gas[J]. New Agriculture, 2009, 4(2): 59-60. (in Chinese)
- 9 方虹. YD-1 型二氧化碳烟气净化机的研制[J]. 农业科技与备, 2013, 13(6): 47-52.  
FANG Hong. Development of YD-1 carbon dioxide gas cleaning machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013, 13(6): 47-52. (in Chinese)
- 10 VASILIS F, JAMES E M, KEN Z. The technical geographical and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US[J]. Energy Policy, 2009, 37(2): 387-399.
- 11 JOHN B, LADO K, DANIELE P, et al. The potential of solar electric power for meeting future US energy needs: a comparison of projections of solar electric energy generation and arctic national wild life refuge oil production[J]. Energy Policy, 2004, 32(2): 289-297.
- 12 DICKINSON W C, CHEREMISIN P N. Solar energy technology handbook[M]. London: Butter Worth, 1980.
- 13 ZEKAI S. Solar energy in progress and future research trends[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 367-416.
- 14 DAVID B, RUXANDR A. Innovation in concentrated solar power[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95(10): 2703-2725.
- 15 王金平, 王军, 张耀明, 等. 槽式太阳能聚光集热器传热特性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 185-192.  
WANG Jinping, WANG Jun, ZHANG Yaoming, et al. Analysis of heat transfer characteristics for parabolic trough solar collector [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 185-192. (in Chinese)
- 16 杨选民, 王雅君, 邱凌, 等. 槽式抛物面太阳能聚光集热器供热厌氧反应器研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 202-207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160728&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160728&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.028.  
YANG Xuanmin, WANG Yajun, QIU Ling, et al. Design and implementation of parabolic trough concentrator heating anaerobic reactor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 202-207. (in Chinese)
- 17 赵国昌, 王永, SCOTT Thompson, 等. 太阳能再热式有机朗肯循环发电系统性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 215-221. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160228&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160228&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.028.  
ZHAO Guochang, WANG Yong, SCOTT Thompson, et al. Performance of reheating solar organic rankine cycle system for power generation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 215-221. (in Chinese)
- 18 GAO Zhichao, SUI Jun, LIU Qibin, et al. Study on parabolic trough solar collector steam generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(5): 721-724.
- 19 ANDREAS P, GEORGE K. Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in mediterranean regions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2772-2783.
- 20 HE Kaiyan, ZHENG Hongfei, TAO Tao. Experimental investigation of high temperature congregating energy solar stove with sun light funnel[J]. Energy Conversion and Management Solar Energy, 2009, 50(8): 3051-3055.
- 21 GENG Z, HALL E R, BERUBE P R. Membrane fouling mechanisms of a membrane enhanced biological phosphorus removal process[J]. Journal Membrane Science, 2007, 296(15): 93-101.
- 22 JOHN T A, ADISA A J. Control of a 3 kW polar-axis solar power platform with nonlinear measurements[J]. Solar Energy, 2010, 26(5): 43-67.
- 23 陈维, 李戡洪. 太阳能利用中的跟踪控制方式研究[J]. 能源工程, 2003, 15(3): 18-21.  
CHEN Wei, LI Jianhong. Research on the track controller methodologies in utilization of solar energy[J]. Energy Engineering, 2003, 15(3): 18-21. (in Chinese)
- 24 尹东文. 太阳能接收器自动跟踪系统研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2011.  
YIN Dongwen. Research on the tracking system of solar controller[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2011. (in Chinese)
- 25 刘森生. 基于图像处理的太阳跟踪控制系统研究与发展[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
LIU Miaosheng. Research and development of sun tracking and controlling system depend on image processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 26 LOVEGROVE K, ZAWADSKI A, COVERNTY J. Paraboloidal dish solar concentrators for multi-megawatt power generation[C]//Solar World Congress 2007, 2007: 1-4.
- 27 MIHAJLO F. Comparative analysis of the solar dish electricity production[J]. Thermal Science, 2005, 64(9): 69-83.
- 28 张瑜, 路博. 一种高精度的太阳跟踪方法[J]. 可再生能源, 2012, 30(2): 103-106.  
ZHANG Yu, LU Bo. A high accuracy method of sun-tracking[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(2): 103-106. (in Chinese)