

# 利用多余光照光伏发电的温室透明覆盖材料的研制

冯朝卿<sup>1,2</sup>, 郑宏飞<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>1,3</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学机械学院, 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 针对高于光饱和点的多余光照对植物生长没有意义的问题, 该文研究了一种可利用多余光照实施光伏发电的新型实体复合抛物面聚光 (compound parabolic concentrate) 温室透明覆盖材料。利用光学仿真软件对不同入射角的太阳光进行追踪, 并对该透明覆盖材料在实际天气下的透过率和发电功率进行试验研究。仿真结果与试验输出功率以及覆盖材料实际透过率的趋势相吻合, 在正午阳光强烈时覆盖材料透过率低, 最低时只有 32%; 而上、下午透过率相对较高, 在 60%左右。研究表明此新型温室覆盖材料可以较好地调节光照, 使温室内的光照度更加均匀, 进而改善温室光热环境, 同时利用多余光照发电, 实现太阳能综合利用。

**关键词:** 温室; 光伏电池; 材料; 覆盖

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.016

中图分类号: S214.3; S625.5<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0135-07

冯朝卿, 郑宏飞, 王 瑞. 利用多余光照光伏发电的温室透明覆盖材料的研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 135-141.

Feng Chaoqing, Zheng Hongfei, Wang Rui. Development of transparent greenhouse cover with function of generating electricity by surplus light and photovoltaic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 135-141. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

光照是温室作物制造养分和生命活动不可缺少的能源, 也是形成温室小气候的主要因素。通过调节温室光照时间和范围来调整温室温度均衡、适中, 可改善作物生长环境, 提高产量和品质<sup>[1]</sup>。目前研究多集中于对温室温度的直接控制, 其在温度控制过程中能量消耗很大, 其中相当一部分是用于夏季温室降温<sup>[2-5]</sup>。最早利用温室天窗开闭进行自然通风降温<sup>[6]</sup>, 但是在炎热的夏季, 自然通风很难达到降温的目的, 安装通风机强制通风又会造成大量的能量消耗<sup>[7-10]</sup>。为此, 国内外学者又提出许多种温室降温方法, 并取得了一定的成果, 如温室外遮阳<sup>[11]</sup>、内遮阳<sup>[12-13]</sup>、遮阳网上喷淋<sup>[14]</sup>、喷雾<sup>[15-16]</sup>、高压冷雾降温系统、湿帘风机降温系统<sup>[17-19]</sup>、细雾风机降温系统等<sup>[20]</sup>。上述研究主要集中在利用一些物理方法将温室内多余的热量吸收或者散掉, 对于利用覆盖材料调节温室光照, 进而辅助调温的研究少有文献提及。目前关于温室覆盖材料的研究主要集中在其保温性能及透过率上<sup>[21-24]</sup>, 关于温室覆盖材料在温室光照调节中的作用的研究较少<sup>[25-29]</sup>。

常用的温室顶面覆盖材料主要是玻璃和透明塑料薄膜, 它们对于调节温室光照无明显优势。光饱和点以上的光照强度对于植物生长无意义<sup>[30]</sup>, 故夏季中午时段过强的太阳光照对植物而言没意义。据此, 本文提出了一种温室透明覆盖材料的新设计, 申请了发明专利, 并制作了多批次的试验样品。这种覆盖材料可以在阳光充足的正午降低其自身透光率, 将多余的太阳辐照通过光伏电池转化为电能, 以实现太阳能的综合利用, 并在调节温室光照的同时辅助降低室温。

## 1 覆盖材料结构及工作原理

本文设计了一种可利用多余光照发电的温室透明覆盖材料, 其结构如图 1 所示。实体复合抛物面聚光器 (compound parabolic concentrator, CPC) 是主要部件, 它由高透明度的有机玻璃 (聚甲基丙烯酸甲酯) 制成。CPC 可以聚光, CPC 下端贴光伏电池 (photovoltaic, PV) 发电, 随着入射光线入射角的变化, 光线的透过率也随之变化。

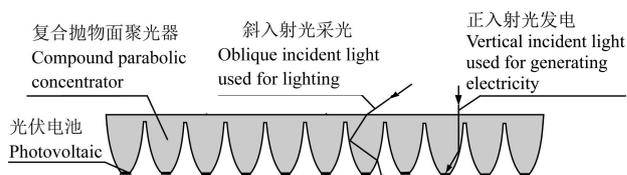


图 1 透明实体复合抛物面聚光覆盖材料  
Fig.1 Transparent entity compound parabolic concentrate cover

收稿日期: 2013-12-18 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家高技术“863”项目 (2013AA102407-2)

作者简介: 冯朝卿 (1981-), 女, 河北人, 讲师, 博士生, 主要从事太阳能利用研究。北京 北京理工大学机械与车辆学院, 100081。

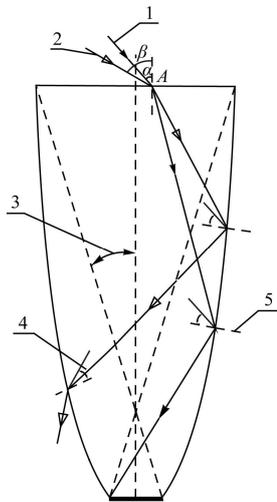
Email: fchaoqing@163.com.

实体 CPC 的几何聚光比为 4, CPC 左、右侧抛物线方程分别用式 (1) 和式 (2) 表示。方程 (1) 和方程 (2) 分别来自焦距为 2.8 mm 的一个标准抛物线, 并将左右两边曲线分别向 y 轴方向旋转 14.48° 后得到的曲线。不同入射角的光线在照射实体 CPC 的时候在其不同表面会发生折射和反射, 其光路图如图 2 所示。

$$0.968y + 0.2504x + 75.1 = (0.2504y - 0.968x + 72.6)^2 / 375 \quad (1)$$

$$0.968y - 0.2504x + 75.1 = (0.968x + 0.2504y + 72.6)^2 / 375 \quad (2)$$

式中:  $x$  和  $y$  分别为直角坐标系中的坐标, m。



1.有效发电光线 2.有效采光光线 3.实体 CPC 的半个最大接收角, (°)  
4.全反射临界角, (°) 5.曲面法线  
1. Effective generates electricity light 2. Effective lighting light 3. Half maximum acceptance angle of entity CPC, (°) 4. Critical angle of total reflection, (°) 5. Surface normal  
注:  $A$  为入射点;  $\alpha$ 、 $\beta$  为入射角, (°).  
Note:  $A$  is incidence point;  $\alpha$ ,  $\beta$  are incidence angle, (°).

图 2 实体复合抛物面聚光器光路图

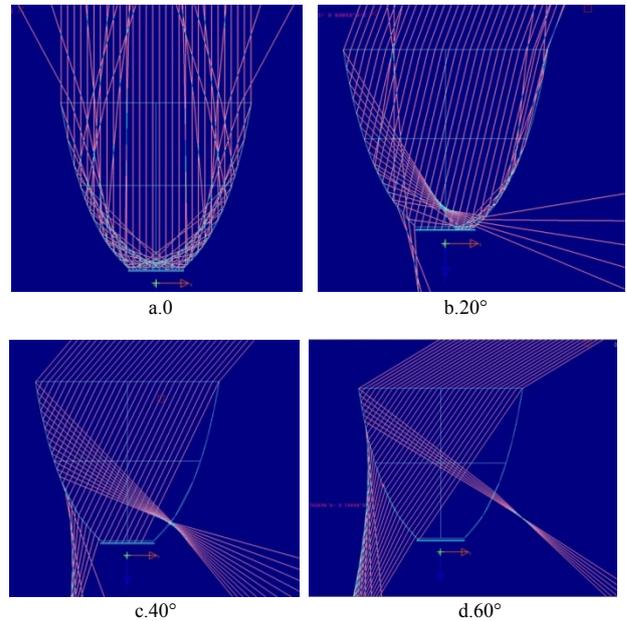
Fig.2 Entity compound parabolic concentrator optical path diagram

射到 CPC 上表面的光线可以分为 2 类, 一类光线可以投射到 CPC 底部的光伏电池上发电, 比如光线 1, 它是有效发电光线。光线 1 与入射面法线构成的夹角为入射角  $\alpha$ , 有效发电光线是指入射光 1 经实体 CPC 上表面的一次折射后射到侧面曲壁, 在曲壁上由于满足全反射条件发生一次全反射后, 恰好射到实体 CPC 底部和另一侧曲面壁的结合处。此时, 光线 1 恰好可被透明实体 CPC 底部的光伏电池接收。进而可推出, 射于  $A$  点且入射角小于  $\alpha$  的入射光经折射和反射后均可汇聚于光伏电池, 因此, 该类入射光最终会汇聚于光伏电池上, 可用来发电。另一类光线可以透过 CPC 实现温室内采光, 比如光线 2, 它是有效采光光

线。光线 2 入射点同为  $A$  点, 与入射面法线构成的入射角为  $\beta$ , 由于  $\beta$  大于  $\alpha$ , 故光线 2 经透明实体 CPC 折射和反射后, 最终由实体 CPC 下部射出, 进入温室内从而实现采光。

## 2 光学仿真

为了研究实体 CPC 温室板材在不同光线入射角时的光路, 利用 Light Tools 光学仿真软件对其进行分析。Light Tools 软件是由美国 Optical Research Associates (ORA) 公司于 1995 年开发而成的光学系统建模软件, 它是一个全新的具有光学精度的交互式三维实体建模软件体系, 具有扩展的数值精度和专门进行光学设计的光线追迹工具, 可实现系统建模, 复杂光路设置, 杂光分析和照明系统设计分析等功能。此处利用 Light Tools 进行光线追迹, 将入射光设为平行光, 实体 CPC 材料设定为有机玻璃, 不同入射角时的光路图如图 3 所示。



注: 箭头为定位坐标系。  
Note: The arrows indicate coordinates.

图 3 不同入射角时的光路图

Fig.3 Optical path diagram of different incidence angles

由图 3 可知, 入射角为 0 时, 入射光线可分为 2 部分, 一部分透过上表面后, 直接入射到光伏电池上; 另一部分, 则首先投射到 CPC 的曲壁上, 经曲壁的全反射, 被反射到底部的电池上, 故无光线从实体 CPC 下面透出。随着入射角的增大, 逐渐有部分光线透过实体 CPC, 且入射角越大, 透过的光线越多。当入射角为 20° 时, 透过光线达到了 25%。入射角至 40° 时, 透过光线已达 77%。当入射角达到 60° 时, 几乎所有光线都透过实体 CPC。仔细分析入射角为 0 时的光路图, 发现有部分光线在 CPC

底面发生全反射之后既没有汇聚到电池板上，也没有透过实体 CPC，而是从 CPC 上表面反射出去了，应该避免底面发生全反射。

为了进一步分析实体 CPC 对光线的汇聚作用，利用 Light Tools 软件将  $0\sim 60^\circ$  入射角的光线分布情况进行仿真，得到透过率、电池接收率及反射率（由 CPC 上表面反射出去的光线占入射光比例）的变化曲线，如图 4 所示。

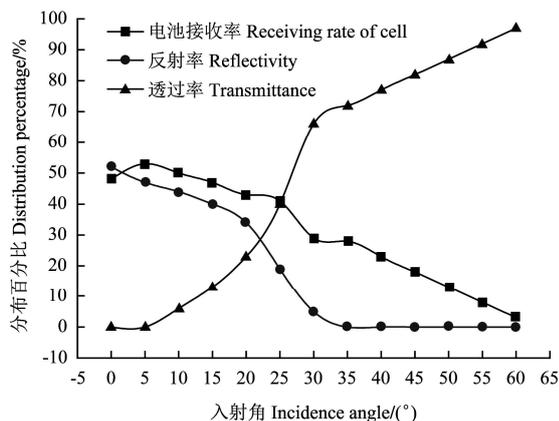


图 4 不同入射角下光线的分布

Fig.4 Lights distribution of different incidence angles

由图 4 可以看出，随着入射角增大，实体 CPC 的透过率逐渐增大，电池接收率与反射率都在逐渐减小。在入射角较小时，由 CPC 反射出去的光线所占比例较高，入射角为  $0^\circ$  时反射率高达 50%，当入射角大于  $20^\circ$  时反射率明显降低，当入射角大于  $30^\circ$  时反射率趋于 0；电池板对光线的接收率随入射角的增加逐渐减小，其变化接近线性关系；入射角在  $0\sim 30^\circ$  范围内变化时，实体 CPC 的光线透过率由 0 迅速增大到 70% 左右，当入射角大于  $30^\circ$  时，透过率增速变缓。

为了提高入射角较小时电池板的接收率，降低由于实体 CPC 底面全反射造成的损失，可以在 CPC 底面与电池板之间增加一层增透膜，其密度介于空气与有机玻璃之间，可有效减少 CPC 底面的全反射。

### 3 试验及性能测试

#### 3.1 试验装置及试验方法

##### 3.1.1 试验装置

建立如图 5 所示的试验系统，主要由积分箱（采用积分球原理）、透明实体 CPC 覆盖材料（长  $30\text{ cm}\times$  宽  $27\text{ cm}\times$  厚  $2\text{ cm}$ ）、照度计、电压表、电流表等组成。其中 TES-1339 型照度仪量程为  $(0.01\sim 999\ 900)\text{ lx}$ ，照度计安装在自制积分箱上方。积分箱尺寸为  $36\text{ cm}\times 32\text{ cm}\times 32\text{ cm}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高），其内壁涂了可使光发生漫反射的白色涂层，

进入积分箱的光线经漫反射后，形成均匀的漫射光线，从而保证测点处照度的均匀，以便使用照度仪测量。测试光伏电池发电功率的电流表和电压表型号分别为 UNI-T UT70D（精度 $\pm 0.1\text{ mA}$ ，优利德科技有限公司，东莞）和 UNI-T UT33B（精度 $\pm 1\text{ mV}$ ，优利德科技有限公司，东莞）。光伏电池为市售薄膜电池，其光电转换效率约为 8%。试验地点为北京理工大学实验楼顶（ $39^\circ 51' 45''\text{ N}$ ， $116^\circ 18' 49''\text{ E}$ ）。由于试验场地附近有高楼遮挡，试验开始时间 09:00，试验日期为 2013 年 11 月 4 日 09:00—16:30，天气晴朗。

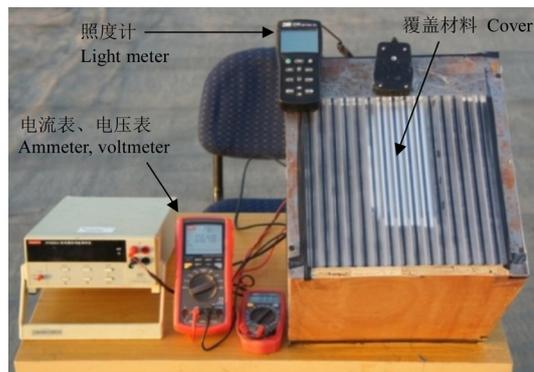
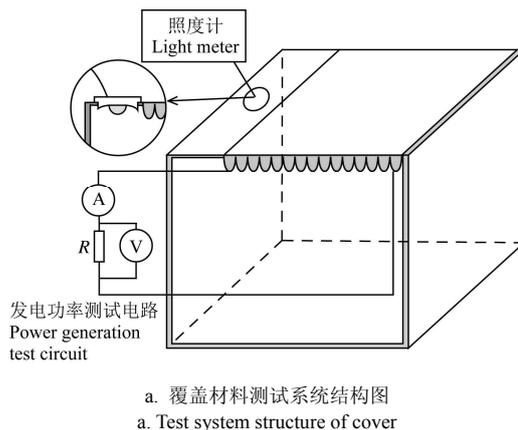


图 5 覆盖材料测试系统结构及实物图

Fig.5 Test system structure and device of cover

测试时先将装置放置于水平地面，保证试验用覆盖材料前缘与正南方向垂直，然后将装置后端抬高使覆盖材料法线与水平地面夹角为测试当天最大太阳高度角（ $33.8^\circ$ ），保证当天正午时刻入射角为  $0^\circ$ （以便与仿真相对照）。将装置固定后，开始试验测试，装置无跟踪系统。

##### 3.1.2 测试方法

透过率测试方法：将积分箱置于户外，覆盖材料平面与地面夹角为  $33.8^\circ$ 。未放置覆盖材料时，测试积分箱内的光强计为  $Lx_1$ ；然后将 CPC 覆盖材料置于积分箱之上，再次测试其内的光强计为  $Lx_2$ ，则透光覆盖材料的透过率为：

$$\text{透过率} = \frac{Lx_2}{Lx_1} \times 100\% \quad (3)$$

为了分析实际天气下光伏电池的发电情况,试验中将光伏电池贴于 CPC 的底面,令其可接收射入的光线以发电。发电功率采用式(4)计算:

$$P=UI \quad (4)$$

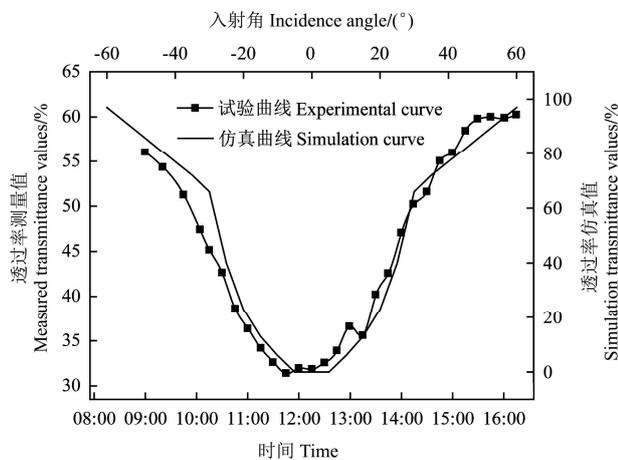
式中:  $P$  为发电功率,  $W$ ;  $U$  为电压,  $V$ ;  $I$  为电流,  $A$ 。

### 3.2 性能测试

#### 3.2.1 覆盖材料透过率测试

为了得到覆盖材料在实际天气下的调节光照效果,对覆盖材料在实际天气下进行了透过率测试。

将试验测得的透明覆盖材料透过率变化曲线和仿真结果进行对比,如图6所示。



注: 入射角的正负代表光线入射方向。试验日期 2013-11-04, 晴。  
Note: The positive and negative of the incidence angle represent the incidence direction of the lights. Test date 2013-11-04, sunny.

图6 仿真和试验透过率的对比

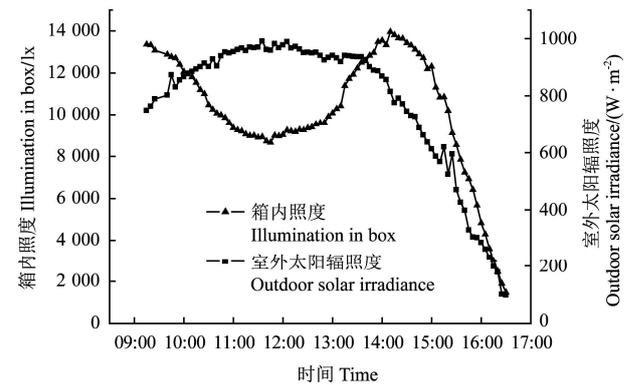
Fig.6 Comparison of simulation and experimental transmittance

由图6可知,试验中透明覆盖材料的透过率随时间的变化趋势与仿真结果较吻合,试验结果表明在正午时段透过率最低,且透过率随入射角绝对值的增大而逐渐增大,呈现出先急后缓的趋势,与仿真结果有很好的 consistency。这种现象可解释如下:当入射角小于  $30^\circ$  时,实体 CPC 的 2 个侧壁都能接收到太阳光,大部分都被反射到底部的电池上,随着入射角增加,透射的光从无到有,透射率迅速增加。当入射角大于  $30^\circ$  时,实体 CPC 的一个侧壁将接收不到光线,而另一侧壁接收的光线,部分直接经该壁透射,部分经反射后从另一壁透射,故大部分的光线已经透过,随着角度的增加,所能增加的透射光线有限,因此透过率增加趋势变缓。对应试验曲线,拐点出现在 10:15 和 14:15 左右。关于试验值与仿真值在大小上存在较大差异的原因,是由于仿真中假设了太阳光只有直射光,而实际天气下散射

光占有一定比例。仿真中在正午太阳光入射角为  $0^\circ$  时,直射光的透过率为  $0$ ; 在入射角大于  $60^\circ$  时,透过率接近  $100\%$ 。而试验中散射光可以透过覆盖材料,因此正午出现透过率最低值为  $32\%$ 。由于有机玻璃覆盖材料自身的透过率的影响使得最大透过率仅为  $60\%$  左右。

#### 3.2.2 积分箱内照度测试

为了测试加装覆盖材料后,温室内光照是否能够满足植物生长需求,同时对积分箱内照度及室外太阳辐照度随时间的变化规律进行测试,结果如图7所示。



注: 试验日期 2013-11-04, 晴。

Note: Test date 2013-11-04, sunny.

图7 积分箱内照度及室外太阳辐照度随时间的变化

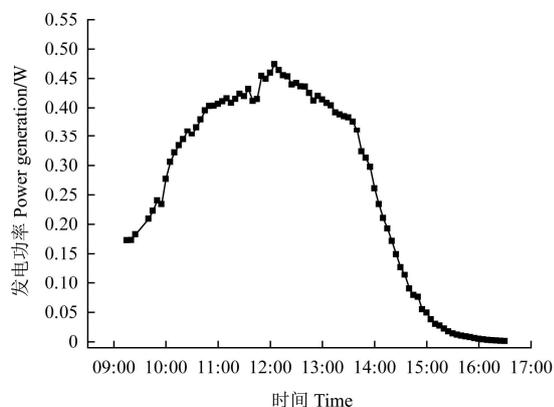
Fig.7 Integral box illumination and outdoor solar irradiance changes with time

由图7可知太阳辐照度最大值出现在 12:00 左右,而箱内照度在一天内变化趋势是驼峰状,峰值出现在 09:00 和 14:30,在辐照最强的中午时段,箱内照度反而较低,这是由于中午时段太阳光入射角较小,而入射角较小的光线射入实体 CPC 后大部分被电池板接收,透过率小,因此中午时段箱内照度较低。14:30 之后,随着太阳辐照度的逐渐下降,箱内照度也迅速下降。此外,在测试时间 09:00—15:30 期间,积分箱内照度虽有波动,但仍均在  $8000 \text{ lx}$  以上,满足多种植物的光补偿点<sup>[30]</sup>,适合植物生长需求。

#### 3.2.3 覆盖材料光伏发电性能测试

图8所示为贴于 CPC 底部光伏电池的发电功率随时间的变化曲线。由图8可以看出,光伏电池的输出功率可达  $0.5 \text{ W}$ ,除以试验覆盖材料面积得到单位面积输出功率为  $6.2 \text{ W/m}^2$ ,出现在中午 12:15;在 10:30—14:00 之间都保持较高的输出功率,这恰与透过率曲线趋势相反,形成太阳能利用互补。究其原因 10:30—14:00 时段覆盖材料透过率低,光线大部分被光伏电池接收发电,而太阳辐照则保持较高的水平,故光伏电池输出功率较高。在正午时刻,太阳辐照值最大而透过率最小,所以被覆盖

材料遮挡并由光伏电池接收发电的能量最多，发电效率最高。在 10:30 之前以及 14:00 之后，在太阳辐照值逐渐减小和覆盖材料的透过率逐渐增大的双重作用下，光伏电池接收能量迅速减小，发电功率也随之迅速减小。



注：试验日期 2013-11-04，晴。

Note: Test date 2013-11-04, sunny.

图 8 光伏电池发电功率随时间的变化

Fig.8 Power generation of photovoltaic cell changes with time

## 4 讨论

值得指出的是，现阶段覆盖材料为试验样品，材质为市售有机玻璃，价格便宜。实现批量生产，成本还可以大幅降低。由试验结果可知，利用多余光照的发电功率为  $6.2 \text{ W/m}^2$ ，属额外获取的高品质能源。由于试验用光伏电池为薄膜电池，光电转换效率仅 8%，故采用效率约 30% 的高聚光太阳能电池还可进一步提高发电功率。此外，避免覆盖材料 CPC 聚光棱底面的入射光发生全反射，如增加增透膜等措施提高光伏电池的光线接收率，也可更进一步提高发电功率。对于该种覆盖材料在温室上的安装应用方式，可分 2 种情况：当覆盖材料 CPC（聚光棱）东西向放置时，由于太阳高度角变化范围有限，适当放置该透明材料，可使得一天内的整体透过率都保持在较低水平。由于南方全天光照及温度均偏高，因此，这种放置情况非常适合南方温室使用；覆盖材料 CPC（聚光棱）南北向放置时，可以通过调节覆盖材料的倾斜度，使早晚透过率较高，中午透过率低，正好适合北方使用，因为北方夏季正午光照强烈，正好被本覆盖材料遮挡，而上、下午透过本覆盖材料的日光仍然可以满足温室内作物的要求。对于冬季乃至春秋季节光照并不充足的时间而言，可以选择种植阴生植物，也可达到良好的经济性。总之，该覆盖材料的使用可以因地制宜，实现较好的效果。

在温室建设中，该覆盖材料可用于屋顶或南墙，使温室内光照均匀，且实现采光和发电一体化

应用。也可应用于其他建筑屋顶，防止室内光照炫目，增加建筑设计美感，实现绿色建筑目的。

## 5 结论

新型实体复合抛物面聚光（compound parabolic concentrate）透明覆盖材料的仿真和试验研究表明，在中午光照充足时段，室外太阳辐照度接近  $1000 \text{ W/m}^2$  时，该覆盖材料透过率低，最低时只有 32%；而上、下午透过率相对较高，在 60% 左右。该覆盖材料可以在不影响温室内上、下午光照的同时大幅削减中午时段进入温室的光照，最多可削减 60% 以上，改善了温室光照不均现象。同时利用贴于 CPC 底部的光伏电池接收多余的光照发电，单位面积发电功率约为  $6.2 \text{ W/m}^2$ 。该覆盖材料既能解决温室内光照不均的问题，又可以提高太阳能综合利用率，有较好的应用前景。此外还应指出的是，本文选择了一典型晴朗天气下的试验进行讨论分析，对于其他天气比如阴天，散射光比例会增大，装置发电效率会有所下降。

### [参 考 文 献]

- [1] 屈毅, 宁铎, 赖展翹, 等. 温室温度控制系统的神经网络 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 307-311.  
Qu Yi, Ning Duo, Lai Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 307-311. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张军, 张侃谕. 温室温度控制系统不确定性与干扰的灰色预测补偿算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 225-233.  
Zhang Jun, Zhang Kanyu. Grey prediction compensation algorithm for the uncertainty and interference of greenhouse temperature control system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(10): 225-233. (in Chinese with English abstract)
- [3] Papadakis G, Mermier M, Meneses J F, et al. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(3): 219-227.
- [4] Mohammadi A, Omid M. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran[J]. Applied Energy, 2010, 87(1): 191-196.
- [5] Manzano-Agugliaro F, Cañero-Leon R. Economics and environmental analysis of Mediterranean greenhouse crops[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(22): 3009-3016.
- [6] Kittas C, Katsoulas N, Baille A. Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions[J]. Journal of Agricultural Engineering

- Research, 2001, 79(3): 349—360.
- [7] 李永欣, 王朝元, 李保明, 等. 荷兰 Venlo 型连栋温室夏季自然通风降温系统的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 44—48.  
Li Yongxin, Wang Chaoyuan, Li Baoming, et al. Experimental research on cooling effect of natural ventilation in a venlo-type multi-span greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 153—158.  
Wu Feiqin, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 153—158. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王双喜, 王旭. 塑料连栋温室不同通风机构的通风率[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 248—252.  
Wang Shuangxi, Wang Xu. Ventilation rate of various vents in plastic covered multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 248—252. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kittas C, Karamanis M, Katsoulas N. Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(8): 807—812.
- [11] 王吉庆, 张百良. 几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 257—260.  
Wang Jiqing, Zhang Bailiang. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 257—260. (in Chinese with English abstract)
- [12] 余亚军, 滕光辉, 马承伟. 上排风方式在华北型连栋温室夏季降温中的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 29—32.  
Yu Yajun, Teng Guanghui, Ma Chengwei. Preliminary experimental study of up ventilation cooling method in a multi-span huabei-type greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6): 29—32. (in Chinese with English abstract)
- [13] Kittas C, Bartzanas T, Jaffrin A. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 87—94.
- [14] 陈传艳, 赵纯清, 张继元, 等. 温室吸湿剂喷淋除湿降温系统的影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 202—207.  
Chen Chuanyan, Zhao Chunqing, Zhang Jiyuan, et al. Analysis of influencing factors of dehumidifying and cooling system with moisture absorbent spraying for greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 202—207. (in Chinese with English abstract)
- [15] 沈明卫, 陈志银, 苗香雯. 连栋温室遮阳网上喷雾降温性能研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 65—68.  
Shen Mingwei, Chen Zhiyin, Miao Xiangwen. Performance of spray cooling on sun shading net of multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 65—68. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谭胜男, 汪小岳, 保智敏, 等. 温室内喷雾降温系统的 CFD 模拟[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(2): 283—287.  
Tan Shengnan, Wang Xiaochan, Bao Zhimin, et al. CFD simulation of as pray cooling system in greenhouse[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Science, 2013, 29(2): 283—287. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵杰强, 赵云, 吴伟雄. 塑料温室中湿帘风机通风条件下降温效果研究[J]. 农业工程, 2012, 2(10): 13—15.  
Zhao Jieqiang, Zhao Yun, Wu Weixiong. Cooling effects with fan pad ventilated in plastic greenhouse[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(10): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘妍华, 孟庆林, 张东霞, 等. 亚热带地区夏季温室温度调节措施效果比较[J]. 西北农林科技大学学报, 2012, 40(8): 144—150.  
Liu Yanhua, Meng Qinglin, Zhang Dongxia, et al. Comparison of the effects of temperature regulating measurements for summer greenhouse in subtropics area[J]. Journal of Northwest A&F University, 2012, 40(8): 144—150. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王蕊, 须晖, 马健, 等. 基于流体力学的湿帘风机温室内气流运动的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 250—255.  
Wang Rui, Xu Hui, Ma Jian, et al. CFD analysis of airflow distribution in greenhouse with pad and fan cooling system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 250—255. (in Chinese with English abstract)
- [20] 冉春雨, 李景安, 赵小平. 玻璃温室夏季降温研究与应用[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2002, 19(4): 31—34.  
Ran Chunyu, Li Jing'an, Zhao Xiaoping. Temperature decreasing research and use for glass greenhouse in summer[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2002, 19(4): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李惟毅, 韦雪松. 温室覆盖材料的热学性质[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(增刊 1): 171—174.  
Li Weiyi, Wei Xuesong. The thermal property of greenhouse covering materials[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(Suppl.1): 171—174. (in Chinese with English abstract)
- [22] 卫向东, 须晖, 马健, 等. 农用塑料薄膜光质辐射透过性能[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 164—167.  
Wei Xiangdong, Xu Hui, Ma Jian, et al. Radiation transmittance performance in light quality of the agricultural plastic films[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 164—167. (in Chinese with English abstract)
- [23] 周长吉, 周新群. 温室透光覆盖材料流滴性测试方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 233—236.  
Zhou Changji, Zhou Xinqun. Method for evaluating anti-drop property of glazing materials for greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(6):

- 233—236. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杜红斌, 周健, 张付春, 等. 日光温室塑料棚膜透光率比较[J]. 塔里木大学学报, 2006, 18(2): 12—14.  
Du Hongbin, Zhou Jian, Zhang Fuchun, et al. The comparison of the transmittance on different solar greenhouses plastic film[J]. Journal of Tarim University, 2006, 18(2): 12—14. (in Chinese with English abstract)
- [25] Lamnatou C, Chemisana D. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fluorescent solar concentrators, photoselective and other materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27(11): 175—190.
- [26] Espi E, Salmeron A, Fontecha A, et al. Plastic films for agricultural applications[J]. Journal of Plastic Film and Sheeting, 2006, 22(2): 85—102.
- [27] Schettini E, Vox G. Greenhouse plastic films capable of modifying the spectral distribution of solar radiation[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2010, 41(1): 19—24.
- [28] Pearson S, Wheldon A E, Hadley P. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 62(1): 61—70.
- [29] Miguel A F, Van de Braak N J, Bot G P A. Analysis of the airflow characteristics of greenhouse screening materials[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(2): 105—112.
- [30] 杨其长, 魏灵玲, 刘文科, 等. 植物工厂系统与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

## Development of transparent greenhouse cover with function of generating electricity by surplus light and photovoltaic

Feng Chaoqing<sup>1,2</sup>, Zheng Hongfei<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

3. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The common cover materials of greenhouses are glass and transparent plastic film. Generally speaking, they have no significant advantage for adjusting incidence lights of greenhouses. Given that the light intensity above the light saturation point is meaningless for plant growth, as in summer, the strong sunlight at noon is surplus, that is, surplus light is unused, so a new kind of entity Compound Parabolic Concentrator (CPC) transparent greenhouse cover is proposed. The cover consists of many entity CPCs, meaning that the material is plexiglass (polymethyl methacrylate) and has high transparency. This cover can change the light paths, and the compound parabolic cells that stick to the bottom of the CPC can generate electricity. Lights of different incidence angles are tracked by optical simulation software; and, the relationship between the lights of incidence angles and transmittance has been analyzed. A test sample has been produced and a test system has been built. Also, an experimental study of transmittance and power generation under actual weather has been conducted. The test system consisted of an integral box (using the integrating sphere principle), a transparent entity CPC cover material (size: 30 cm × 27 cm × 2 cm), a light meter, a voltmeter, an ammeter, and so on.

Test method: 1) Put the test device on horizontal ground and make sure that the front edge of the cover is vertical in the south direction; 2) Raise the back of the cover and make sure that the angle between the normal of the cover and ground is the biggest solar elevation angle (33.8°) on the test day, and ensure that the incidence angle is 0° at noon. It can be seen from the transmittance test that the transmittance is lowest at noon. With the increase of the absolute value of the incidence angle, the change of the transmittance curve presents a trend that is rapid before becoming slow. The turning point of the transmittance curve appears at 10:15 AM and 14:15 PM, while the incidence angle is about 30 deg, and is in good agreement with simulation results. An integral box illumination test shows that the greatest solar irradiance appears at about 12:00; the change trend of the integral box illumination in one day is hump-shaped; and that peak values appear at 9:00 AM and 14:30 PM, respectively. When the irradiance is strongest, at noon, the illumination in the box is low. Experimental and simulation results match well and show that the lowest transmittance is only 32%, and appears when there is strong sunshine at noon; while in the morning and afternoon, the transmittance of cover material can reach 60%. Although the covering material has almost no influence on the light intensity entering a greenhouse in the morning and afternoon, while substantially reducing light intensity at noon, it can improve the status of uneven illumination in a greenhouse in one day. Also, because the photovoltaic cells are stuck to the bottom of the CPC, it can receive the surplus light to generate electricity; the power per unit area is 6.2 W/m<sup>2</sup>. This new cover can control light well and because it can adjust the thermal environment in a greenhouse, it is conducive to the growth of plants; furthermore, because surplus light can be used to generate electricity and the system makes good use of solar energy, it has good application prospects.

**Key words:** greenhouses; photovoltaic cells; materials; cover

(责任编辑: 张俊芳)