

# 聚光式太阳灶光效率特性分析

高文娟 陈晓夫

(中国农业工程研究设计院)

## 提 要

本文对聚光式太阳灶光效率的三个参数 $\rho$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 进行了分析和理论计算。对灶面为镀铝薄膜反光材料的太阳灶得出了理论计算最大值 $\eta_0 = 0.77$ ，结合试验结果提出了设计聚光式太阳灶时应考虑的要点。

聚光式太阳灶的光效率是衡量太阳灶性能的重要参数之一，它的好坏直接影响太阳灶的煮水热效率和使用效果，因此，讨论太阳灶的光效率对太阳灶的设计和改进行具有一定的指导意义。

旋转抛物面聚光式太阳灶的光效率<sup>(1)</sup>

$$\eta_0 = \rho\alpha\gamma \quad (1)$$

式中：

$\rho$ ——太阳灶灶面反射率，

$\alpha$ ——太阳灶炊具底平面对入射辐射的吸收率，

$\gamma$ ——太阳灶炊具底平面对入射辐射的截获率。

以下，我们分别对这三个参数 $\rho$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 进行分析和讨论。

## 一、太阳灶灶面反射率 $\rho$

目前使用的太阳灶，灶面大多采用贴镀铝薄膜反光材料，对于贴玻璃反光材料的灶面，由于粘贴不便、价格高、光热性能较差而逐渐被淘汰<sup>(2)</sup>。本文仅讨论灶面为镀铝薄膜反光材料的太阳灶。

胶带式镀铝薄膜反光材料是以聚酯薄膜为基材采用真空镀铝而成的。根据实验结果，其镀铝面反射率为85.5%<sup>(3)</sup>，它属于正面镜式反射表面（其反射率在入射角小于60°范围内变化很小，而太阳灶在使用范围内灶面上各点太阳光入射角均小于60°），因此，可以近似取整个太阳灶的灶面反射率为 $\rho = 85.5\%$ 。

## 二、太阳灶炊具底平面对入射辐射的吸收率 $\alpha$

太阳灶炊具底平面对入射辐射的吸收率取决于入射辐射的方向及锅底吸收涂层对入射光线的光学折射率。根据菲涅尔导出的非偏振辐射，通过折射率为 $n_1$ 的介质1到折射率为 $n_2$ 的

介质2的反射率公式(4)：

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (2)$$

式中： $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为光线的入射角和折射角。

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}$$

涂酚醛黑漆的锅底，对入射光线的折射率 $n_2 = 1.8(5)$ ，空气的光学折射率近似为 $n_1 = 1$ 。因此，灶面反射的能量由空气进入锅底平面时，其折射角：

$$\theta_2 = \arcsin \left( \frac{\sin\theta_1}{n_2} \right) \quad (3)$$

为了分析方便，我们以测试太阳灶热性能时所用的日用平底铝锅为例，由于这种锅底涂黑后直接吸收灶面反射辐射能。可以认为透过率 $\tau = 0$ 则

$$\alpha + \rho = 1$$

$$\alpha = 1 - \rho = 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (4)$$

对于抛物面型聚光式太阳灶灶面上任一点，灶面吸收率均可按(4)式计算。由于灶面上点的位置不同，则反射光线的入射角不同，因而吸收率 $\alpha$ 也不同。对于整个灶面的平均吸收率：

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \iint_S \alpha ds \quad (5)$$

式中 $S$ 为灶面曲面面积。

按三圆作图(6)法设计的太阳灶，其灶面在 $xoy$ 面上的投影如图1所示，将计算 $\bar{\alpha}$ 的公式(4)换算到 $xoy$ 平面上投影计算，则得：

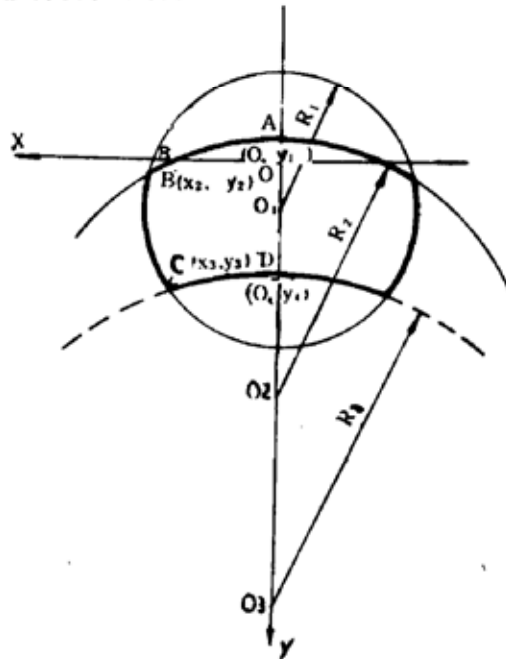


图1 灶面投影图

Fig.1 Projection of Solar Cooker surfale

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \left\{ \int_{y_1}^{y_2} \int_0^{\widehat{AB}} \alpha \cdot \frac{1}{2f} \sqrt{4f^2 + x^2 + y^2} ds + \int_{y_2}^{y_3} \int_0^{\widehat{BC}} \alpha \cdot \frac{1}{2f} \sqrt{4f^2 + x^2 + y^2} ds + \int_{y_4}^{y_3} \int_0^{\widehat{CD}} \alpha \cdot \frac{1}{2f} \sqrt{4f^2 + x^2 + y^2} ds \right\} \quad (6)$$

在图 2 与三圆作图法一致的坐标系中, 任意太阳高度角时锅底平面方程为:

$$x - \operatorname{tgh} \cdot z + \operatorname{tgh} \cdot f = 0 \quad (7)$$

式中:

$h$ ——太阳高度角;

$f$ ——抛物面焦距。

抛物面上任意一点  $(x_0, y_0, z_0)$  的反射光线方程:

$$\frac{x}{x_0} = \frac{y}{y_0} = \frac{z-f}{z_0-f} \quad (7)$$

图 2 中  $F$  点为焦点位置, 即锅底平面中心位置。

投射到锅底平面的反射光线与锅底平面的夹角 (投射角)  $\beta$  有下面关系:

$$\sin \beta = \frac{x_0 \cosh + (f - z_0) \sinh}{f + z_0}$$

$$\text{即 } \beta = \arcsin \left[ \frac{x_0 \cosh + (f - z_0) \sinh}{f + z_0} \right] \quad (8)$$

从而得到反射光线投射到锅底平面的入射角:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \beta = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[ \frac{x_0 \cosh + (f - z_0) \sinh}{f + z_0} \right] \quad (9)$$

图 1 中  $\widehat{AB}$  为圆 2 的一部分, 由圆 2 的方程(7) 得:

$$x = \sqrt{\left( \frac{2f \cos \theta}{\sin \theta + \sinh_{\min}} \right)^2 - \left( y - \frac{2f \cosh_{\min}}{\sin \theta + \sinh_{\min}} \right)^2} \quad (10)$$

$\widehat{BC}$  为圆 1 的一部分, 由圆 1 的方程得:

$$x = \sqrt{\left( \frac{2f \cos \theta}{\sin \theta + \sinh_{\max}} \right)^2 - \left( y - \frac{2f \cosh_{\max}}{\sin \theta + \sinh_{\max}} \right)^2} \quad (11)$$

$\widehat{DC}$  为圆 3 的一部分, 由圆 3 的方程得:

$$x = \sqrt{\left[ \frac{2f}{\sinh_{\min}} \sqrt{1 - \frac{H}{f} \sinh_{\min}} \right]^2 - (y - 2f \operatorname{ctgh}_{\min})^2} \quad (12)$$

式中:  $H$ ——设计操作高度。

为便于计算机运算, 对上述积分利用有限差分法计算。取 ZNT—III 型太阳灶(7) 的设计参数:

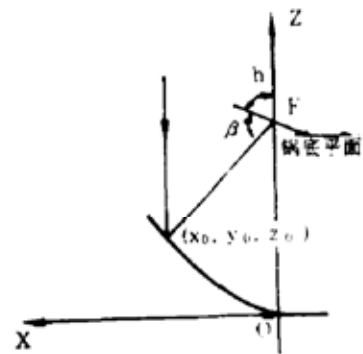


图 2 XOZ 截面示意图  
Fig 2 Sketch map of XOZ section

边缘投射角 $\beta = 20^\circ$

最大太阳高度角 $h_{max} = 70^\circ$

最小太阳高度角 $h_{min} = 25^\circ$

焦距 $f = 0.8m$

设计操作高度 $1.15m$

不同太阳高度角下平均吸收率计算结果如图3所示。

从图3可以看出,当使用高度角 $h$ 小于 $25^\circ$ 时, $\bar{\alpha}$ 的变化较大。当使用高度角 $h$ 大于 $25^\circ$ 时,太阳灶灶面吸收率 $\bar{\alpha}$ 变化较小。为了排除设计条件的影响,我们在新的条件下: $\beta = 20^\circ$ ,  $h_{min} = 10^\circ$ ,  $h_{max} = 70^\circ$ ,  $f = 0.8m$ ,  $H = 1.15m$ 计算其结果如图4所示。图2与图4对比可以看出,其变化规律与图4一致。因此,从太阳灶对入射辐射吸收率的角度来看,太阳灶设计最小高度角定为 $25^\circ$ 较为合理。同时还可看出,太阳灶灶面平均吸收率的最大值为 $0.90$ 。

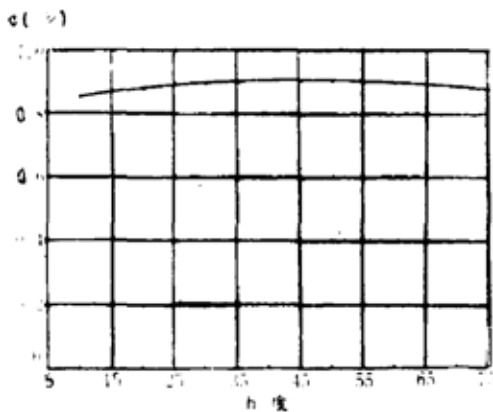


图3 平均吸收率与太阳高度角关系曲线

Fig. 3 Relation curve of average absorption ratio with solar altitude angle

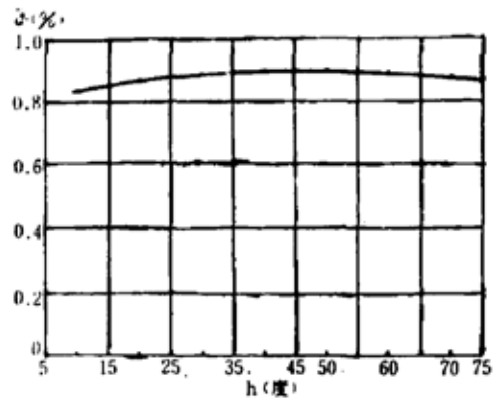


图4 另一条件下平均吸收率与太阳高度角关系曲线

Fig. 4 Relation curve of average absorption ratio with solar altitude angle in another design condition

### 三、太阳灶炊具底平面对入射辐射的截获率 $\gamma$

截获率 $\gamma$ 的影响因素较多,在各种光学、调节和制造误差均不考虑的理想情况下,灶面在不同太阳高度角 $h$ 下反射汇聚到焦点处的焦斑大小按下式计算:

$$d = \frac{2R \operatorname{tg}(16')}{\sin \beta} \quad (13)$$

式中:

$$R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - f)^2}$$

为灶面任意一点到焦点间距离。(公式推导参见图9)

计算结果如图5所示。

设计条件为: $\beta = 20^\circ$ ,  $h_{min} = 25^\circ$ ,  $h_{max} = 73^\circ$ ,  $f = 0.75m$ ,  $H = 1.15m$ 。

从图5可以看出,在灶面两圆相交点和圆与坐标轴交点处, $(x_2, y_2)$ 点反射光线所形成的焦斑直径最大。同时还可看出,在没有任何误差的理想情况下,最大焦斑直径为 $3.4cm$ ,

远小于直径为24cm测试所用的平底铝锅；因此，在这种情况下，可以认为  $\gamma = 1$ ，即由灶面反射的能量都被锅底平面所截获。

但是理想的情况实际上是达不到的，太阳灶的实际焦斑直径远大于 3.4cm，造成这种现象的原因有以下四方面的误差：

1. 定位误差，这种误差是由于吸收器与集中器相对位置的位置误差，在太阳灶的使用过程中，这种误差可以通过适当调节加以消除。因此，在这里可以不考虑定位误差。

2. 指向误差，这是由于集中器即灶面指向角度不准确而引起影象放大及移位的现象。对于连续跟踪的太阳灶，这种误差较小，焦斑不会移出锅底平面，可以不考虑此项误差。对于间歇式手动调节

的太阳灶，则应考虑调节间隔时间的长短对焦斑移动距离的影响。在测试期间，测试者总要保证焦斑在锅底平面以内；因此，经测试所得的太阳灶光效率，其指向误差可以不考虑。对于用户来说，一般使用说明书中要求15分钟左右调节一次。为了验证，本文进行了下列计算，即在某时间间隔内由于方位角及高度角的变化而引起的焦斑移动。

设在  $\Delta t$  时间内时角  $\omega$  由  $\omega_1$  变到  $\omega_2$ ，

则高度角变化：

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \arcsin(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega_2) - \arcsin(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega_1) \quad (14)$$

方位角变化：

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \psi_2 - \psi_1 \\ &= \arcsin \left[ \frac{\cos\delta\sin\omega_2}{\sqrt{1 - (\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega_2)}} \right] \\ &\quad - \arcsin \left[ \frac{\cos\delta\sin\omega_1}{\sqrt{1 - (\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega_1)}} \right] \quad (15) \end{aligned}$$

式中： $\psi$ ——太阳方位角；  
 $h$ ——太阳高度角；  
 $\varphi$ ——地理纬度；  
 $\delta$ ——赤纬角；  
 $\omega$ ——时角。

在图 6 中，由于入射光线角度变化  $\Delta\theta$  而引起的焦斑移动  $D$  计算如下：

$$D = \frac{\sin\Delta\theta}{\sin\gamma} R = \frac{\sin\Delta\theta}{\sin(\beta - \Delta\theta)} \cdot R \quad (16)$$

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - f)^2}$  为灶面 A 点到焦点的距离。

由式 (16) 分别计算由于方位角变化引起的焦斑移动  $E_1$  和由高度角变化引起的焦斑移

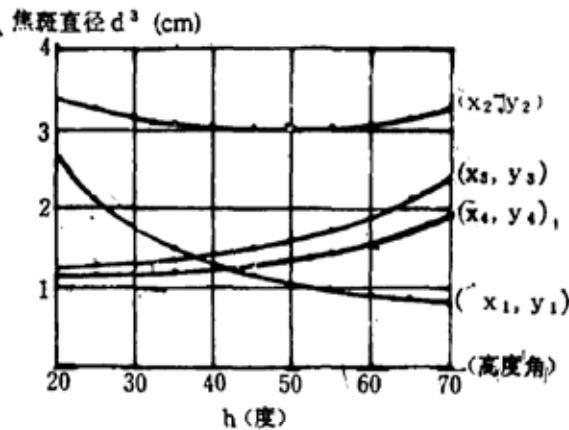


图 5 焦斑直径与高度角关系

Fig.5 Relation of diameter of focal area with solar altitude angle

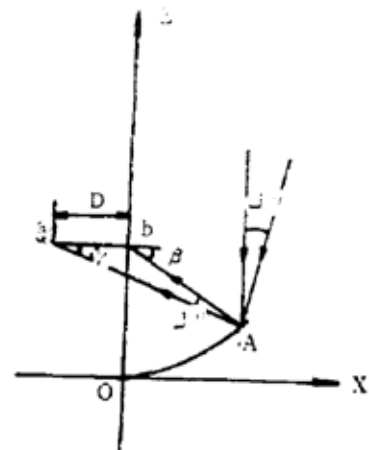


图 6 入射光线角度变化时焦斑的移动  
 Fig.6 Focal area movement caused by angle change of radiation light

动 $E_2$ 则由二者共同作用所引起的焦斑移动:

$$D = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (17)$$

按(17)式对太阳灶灶面各交点部分的计算结果如图7所示。从图7可以看出 $(x_3, y_3)$ ,  $(x_2, y_2)$ 点由于指向误差所引起的焦斑移动较大。因此,以这两点为基准进行分析。在中午焦斑移动最快、最不利的条件下,其焦斑移动与调节时间间隔的关系如图8所示。从图8可以看出,为了使太阳灶焦斑始终保持在锅底平面内,应使焦斑移动距离小于12cm,即调节时间间隔应为10分钟。早上8:00点使用时,从图7可见,焦斑移动最快的为 $(x_1, y_1)$ 点,对该点作出焦斑移动与调节时间间隔的关系如图8所示。从图8可以看出,早上8:00点使用时,调节时间间隔可延长到12~13分钟。

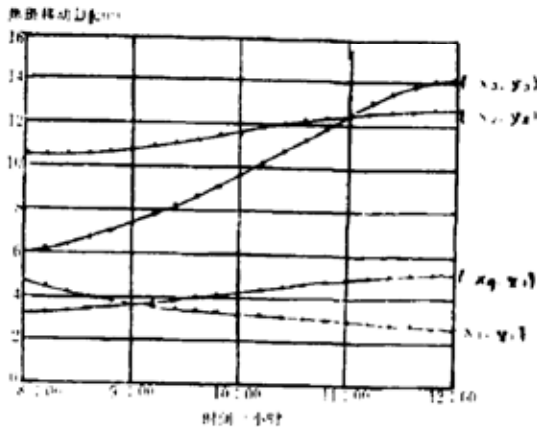


图7 时间变化和焦斑移动关系曲线

Fig. 7 Curve of focal area movement with time

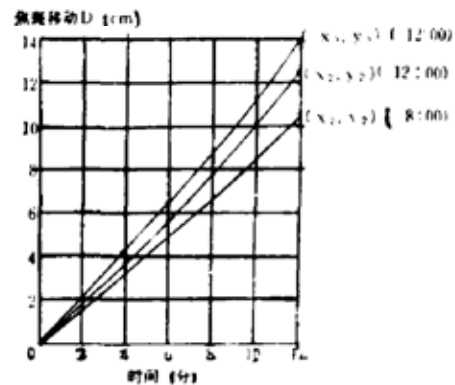


图8 调节时间与焦斑移动关系曲线

Fig. 8 Relation curve of focal area movement with regulating intermission

3. 巨视角误差,这是因为灶面结构上的偏曲,使得太阳影象放大而造成的。它起因于制造工艺,材料刚性引起形状改变而影响灶面反射在焦点上的能量分布。它是对影象影响最大的误差。根据图5所示,讨论结构误差应以 $(x_2, y_2)$ 点为基准,且高度角愈小,焦斑直径愈大。在最小太阳高度角时其误差对焦斑直径的影响计算如下:

如图9所示,在 $\triangle AA'F$ 中,  $A(x, y, z)$ 发生形变至 $A'(x, y, z + EL)$ ,  $F$ 点坐标为 $(0, 0, f)$

$$AF = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - f)^2}$$

$$A'F = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + EL - f)^2}$$

AF与A'F两直线夹角

$$\cos \Delta \alpha = \frac{x^2 + y^2 + (z - f) \cdot (z + EL - f)}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - f)^2} \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + (z + EL - f)^2}}$$

从而:

$$d' = \frac{2R \operatorname{tg}(16' + 2\Delta \alpha)}{\sin \beta} \quad (18)$$

根据(18)式计算结果如图10所示。

对24cm的铝锅,在误差 $EL = 15\text{mm}$ 时,焦斑才有可能大于24cm,而一般太阳灶灶面误差均在15mm以下,因此,仅考虑灶面结构误差时,可近似取 $\gamma = 1.0$ 。

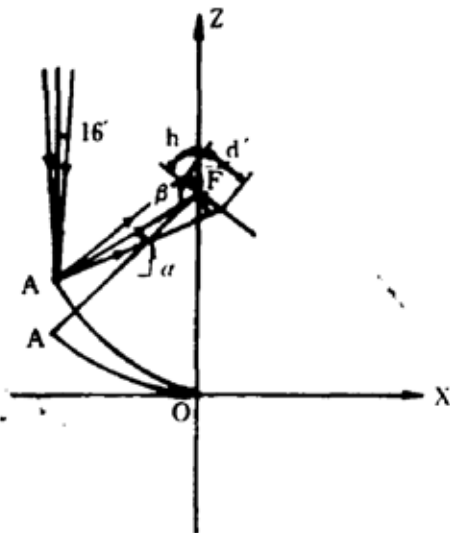


图9 在最小太阳高度角时其误差对焦斑直径的影响  
Fig.9 The effect on focal area diameter caused by structure error in minimum solar altitude angle

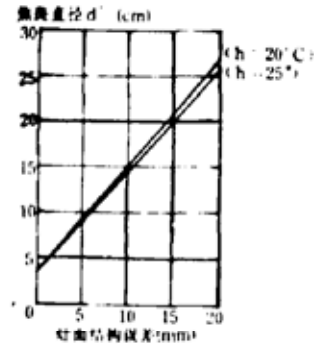


图10 灶面结构误差引起的影像放大  
Fig.10 Image amplification caused by the error of cooker base structure

4. 影像分散, 这种误差与表面细微的不规则有关。分散的结果, 增大了焦点上的影像, 而影像的增大与位置角 $\phi$ 及焦距 $f$ 成正比。这种结果可以看成降低了镜面反射率 $\rho$ 那样, 成为非镜面反射而有散光。可见反射表面光滑程度与影像分散关系甚大。对于镀铝膜反光材料, 由于本身的张力作用, 在贴附于有细微不平的灶面时具有一定的调节作用, 能使误差减至最小。因此, 对于精心制作的太阳灶表面, 可不考虑此种影响。

综上所述, 对于较好的太阳灶表面, 可以近似取太阳灶截获率 $\gamma = 1.0$ 。

根据上述计算及分析结果, 采用镀铝薄膜反光材料的太阳灶, 在锅底直径为24cm, 且锅底涂酚醛黑漆条件下的理想最高光效率为:

$$\eta_0 = \rho \cdot \alpha \cdot \gamma = 0.855 \times 0.90 \times 1.0 = 0.77$$

## 四、试验结果

### 1. 试验方法

聚光式太阳灶热性能方程(8):

$$\eta = \frac{\Sigma mcdt}{I_b A_c d\tau} = \eta_0 - U_c \frac{t - t_a}{I_b} \tag{19}$$

式中:  $\eta$ ——太阳灶热效率, (%) ;

$\Sigma mc$ ——工质和锅具总热容, (kJ/K) ;

$t$ ——工质温度 (°C) ;

$I_b$ ——太阳直射辐照度, ( $W/m^2$ ) ;

$A_c$ ——截光面积, ( $m^2$ ) ;

$\tau$ ——时间, (s) ;

$\eta_0$ ——太阳灶光效率, (%) ;

$U_c$ ——太阳灶综合散热系数, ( $W/m^2 \cdot k$ ) ;

$t_a$ ——环境温度, ( $^{\circ}C$ ) 。

通过对温度响应曲线的具体分析, 可知 $t - t_a = f(\tau)$ 为指数曲线, 在温差不大的范围内近似直线<sup>(9)</sup>, 因此(19)式可改写为;

$$\frac{\Sigma mc \Delta t}{I_b A_c \Delta \tau} = \eta_0 - U_c \frac{t_m - t_a}{I_b} \quad (20)$$

式中:  $t_m$ ——工质平均温度。

在试验中将水温从低于环境温度 $10^{\circ}C$ 加热到高于环境温度 $10^{\circ}C$ , 从而人为造成 $t_m = t_a$ 得到。

$$\eta = \eta_0 = \frac{\Sigma mc \Delta t}{A_c H} \quad (21)$$

式中:  $H$ ——累积直射辐射量。

## 2. 结果分析

根据上述试验方法, 我们对已使用一年的LZT型薄壳铸铁太阳灶在环境条件基本相同的情况下, 在不同的高度角条件下作了4天试验。其结果基本一致。图11给出了1987年7月8日的试验结果。

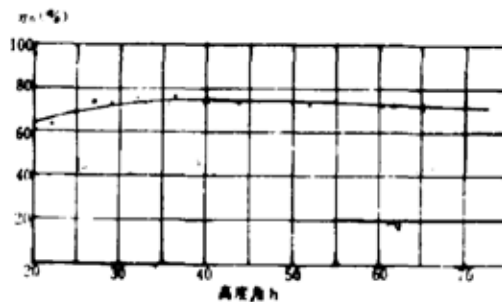


图11 不同高度角和光效率关系试验曲线 (1987年7月8日)

Fig.11 test curve of optical efficiency wllth solar altitude angle

从图中可以看出, 在太阳高度角大于 $25^{\circ}$ 时光效率基本相同。在高度角小于 $25^{\circ}$ 时, 光效率有变小趋势, 和理论计算相吻合。它的光效率的范围在 $70 \sim 74\%$ 。

## 五、结 论

1. 太阳灶光效率在高度角 $25^{\circ}$ 以上变化不大, 因此利用三圆作图法设计的太阳灶, 最小使用高度角定为 $25^{\circ}$ 是合理的。

2. 由于结构误差所造成的焦斑直径增大时, 应以灶面上圆弧两圆相交点为基准考虑。

3. 手动跟踪太阳灶在中午使用时, 其跟踪太阳时间间隔应在10分钟以内, 在有级调节机构设计时应注意到这一点。



## 参 考 文 献

- [1] Jan F.Kreider: "Medium and High Temperature Solar Processes", ACADEMIC PRESS 1979.
- [2] 陈晓夫、高援朝: "我国聚光太阳灶的研究及其发展", 《农业工程学报》, 1987. 1.
- [3] 陈达育: 《农村太阳灶》, 农业出版社, 1985.
- [4] J.A.Duffie, W.A.Beckman: "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley & Sons 1974.
- [5] 李咸平等: 《太阳灶设计参数探讨》全国太阳灶攻关组鉴定资料, 1986.
- [6] 郑效卿: "太阳灶截光面设计方法之一——三圆作图法" 《太阳能学报》Vol. 6, No. 2, 1985
- [7] 屠云璋, 陈晓夫等: "ZNT-Ⅱ型太阳灶的研究设计" 《农业工程学报》1985, 1.
- [8] 刘祖德: "太阳灶煮水工况动态分析与热效率特性", 《太阳灶学报》, Vol. 5, No. 2 1984.
- [9] 张志丹、陈晓夫、高援朝: "锅具散热系数及其对聚光式太阳灶热效率的影响的探讨", 《农业工程学报》1986, 3
- [10] 黄文雄: 《太阳能之应用及理论》协志工业丛书 1975

## ANALYZING OF OPTICAL PROPERTY OF FOCUSING SOLAR COOKER

Gao Wenjuan    Chen Xiaofu

(Chinese Academy of Agricultural Engineering Research and Planning)

### ABSTRACT

Three parameters,  $\rho, \alpha, \gamma$ , are discussed in this article. By analyzing and calculating, the theoretical result of maximum optical efficiency,  $\eta_0 = 0.77$ , is obtained. Combining with experiment results, some suggestions on design of focusing solar cooker are put forward in this paper.