

反射聚光太阳灶热效率的计算与实验

方 铎 荣

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文讨论了反射聚光式太阳灶热效率的计算方法和测试方法,并对一种凹面玻璃太阳灶的热效率进行了计算和实测,二者的结果基本相符。表明本文讨论的反射聚光太阳灶瞬态瞬时效率的测试方法是可行的。

本文从建立反射聚光太阳灶热性能的数学模型入手,用计算机计算了工质温度、日照、环境温度和风速对太阳灶热效率的影响。同时还计算了绝热层与选择性吸收涂层对提高太阳灶热效率的作用。依据计算机模拟实验结果,提出了反射聚光太阳灶的实验方法,以及消除日照与环境温度对热效率影响的效率曲线的整理方法,并对一种凹面玻璃太阳灶的效率曲线进行了测定。实验表明,本文讨论的反射聚光太阳灶的瞬态瞬时效率测定方法是可行的。

一、热效率的计算方法

计算反射聚光太阳灶热效率时,以锅为体系,假定瞬时间为稳定状态,暂先忽略锅的热容(本实验中锅的热容仅占2.6%)。在锅侧、锅盖非绝热时,其能量方程为

$$Q_u = Q_s - (Q_{Lr_1} + Q_{Lh_1} + Q_{Lr_2} + Q_{Lh_2}) \quad (1)$$

式中, Q_u ——锅内得到的有用能量; Q_s ——聚焦在锅底并被吸收的太阳直射辐射能量; Q_{Lr_1} ——锅底外表面的辐射热损; Q_{Lh_1} ——锅底外表面的对流热损; Q_{Lr_2} ——锅侧与锅盖表面的辐射热损; Q_{Lh_2} ——锅侧与锅盖表面的对流热损。

锅内得到的有用能量是锅内工作介质对锅底内壁的对流换热得到的,可由下式求得:

$$Q_u = h_L(T_{w_1} - T) \cdot a_b \quad (2)$$

式中, h_L ——锅内工作介质对锅底的对流换热系数; T_{w_1} ——锅底内壁温度; T ——锅内工作介质平均温度; a_b ——锅底内表面积。

又因锅内获得的热量是由它的外壁面传导得到的,故

$$Q_u = \frac{\lambda}{\delta}(T_{w_2} - T_{w_1})a_b \quad (3)$$

式中, T_{w_2} ——锅底外壁的温度; λ ——锅底的导热系数; δ ——锅底的厚度。

锅底获得的能量 Q_s 为

本文 1980 年 11 月 28 日收到

$$Q_S = I_b \rho A_b \gamma \alpha_b \quad (4)$$

式中, I_b ——单位时间、单位面积上太阳直射辐射能量, ρ ——镜面的反射系数, A_b ——镜面的投影(垂直于太阳光线)面积, γ ——锅底的采集因子, α_b ——锅底的吸收系数。

假定天空温度与环境温度相等, 则锅底的辐射热损失为

$$Q_{Lr1} = a_b \epsilon_b \sigma (T_{w2}^4 - T_a^4) \quad (5)$$

式中, ϵ_b ——锅底外表面的发射系数; σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数; T_a ——环境温度。

锅底的对流损失为

$$Q_{Lh1} = h_1 a_b (T_{w2} - T_a) \quad (6)$$

式中, h_1 为锅底表面对周围空气的换热系数。

计算锅侧与锅盖的辐射热损时, 考虑到工作介质对锅壁换热系数较大, 并假定它的外表面温度与锅内工作介质温度相等, 则

$$Q_{Lr2} = \sigma \epsilon_r a_r (T^4 - T_a^4) \quad (7)$$

式中, ϵ_r ——锅侧与锅盖外表面的发射系数, a_r ——锅侧与锅盖外表面的面积。

锅侧与锅盖外表面的对流热损为

$$Q_{Lh2} = h_2 a_r (T - T_a) \quad (8)$$

式中, h_2 为锅侧与锅盖外表面与周围环境的换热系数。

假定对流换热主要是由风速引起的。据文献[6]给出的经验公式, 不计风速方向对换热的影响, 则有

$$h = h_1 = h_2 = h_w = (5.7 + 3.8V) \times 0.86 \quad (9)$$

式中 h 的单位为 [千卡/米²·小时·K]; V 为风速, [米/秒]。

从上述分析中, 还不能计算太阳灶在工作时的热平衡, 因为锅内壁温度 T_{w1} 及工作介质对锅底的对流换热系数 h_L 都是未知的, 因此, 还必须引入一个方程才能计算。假定锅内的水在沸腾之前的状态下工作, 文献[7]给出:

$$h_L = \frac{0.135 \lambda_L}{d} (G_r P_r)^{\frac{1}{3}} = 0.135 \lambda_L \left(\frac{g \beta \Delta T P_r}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中, λ_L ——在边界层内工作介质(定性温度)的导热系数, d ——锅的直径, G_r ——葛鲁晓夫数 = $\frac{\beta g d^3 \Delta t}{\nu^2}$, P_r ——普朗特数。

方程中 $\Delta T = T_{w1} - T$, T_{w1} 也是未知的, 因此, 需要用迭代法来解。

太阳灶的热效率等于锅内所得到的有用能量与投射在反射镜面上的太阳直射辐射能之比。即

$$\eta = \frac{Q_u}{I_b A_b} = \frac{Q_S - (Q_{Lr1} + Q_{Lh1} + Q_{Lr2} + Q_{Lh2})}{I_b A_b} \quad (11)$$

把方程(4)~(8)代入(11)得到:

$$\eta = \rho \gamma \alpha_b - \frac{a_b \epsilon_b \sigma}{I_b A_b} (T_{w2}^4 - T_a^4) - \frac{a_b h}{I_b A_b} (T_{w2} - T_a) - \frac{a_r \epsilon_r \sigma}{I_b A_b} (T^4 - T_a^4) - \frac{a_r h}{I_b A_b} (T - T_a) \quad (12)$$

当锅侧、锅盖有绝热层时, 并假定绝热材料外表面温度与环境温度相差不大, 忽略辐射

热损。则锅侧与锅盖的对流热损可由下式求得:

$$Q'_{Lh_2} = h_w a'_r (T_r - T_a) \quad (13)$$

式中, Q'_{Lh_2} ——有绝热时锅侧与锅盖的对流热损, a'_r ——有绝热时锅侧与锅盖的外表面面积, T_r ——有绝热时锅侧与锅盖的外表面温度。

同时, 上述热损是由锅通过绝热层传导引起的。

$$\text{则} \quad Q'_{Lh_2} = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T - T_r) \cdot a''_r \quad (14)$$

式中, λ_1 ——绝热材料的导热系数, δ_1 ——绝热材料的厚度, T ——锅侧、锅盖壁温度, a''_r ——锅侧、锅盖在传导计算中的当量面积。

从式(13)(14)可求得 T_r , 假定绝热层不厚, 则 $a'_r = a''_r$, 可得到:

$$T_r = \left(\frac{\lambda_1}{\delta_1} T + h_w T_a \right) / \left(h_w + \frac{\lambda_1}{\delta_1} \right) \quad (15)$$

因此, 有绝热层时的锅侧、锅盖的对流和辐射热损为

$$Q'_{Lr_2} = \sigma \epsilon_r a'_r (T_r^4 - T_a^4) \quad (16)$$

$$Q_{Lh_2} = h_w a'_r (T_r - T_a) \quad (17)$$

二、热效率的计算机模拟实验

选择七五型凹面玻璃太阳灶为对象, 进行模拟计算, 其步骤如下:

1. 锅侧、锅盖非绝热时

(1) 太阳灶的光学、几何参数: 镜面的反射系数 $\rho = 0.85$, 采集因子 $\gamma = 0.94$, 镜面的开口面积 1.023 米^2 , 镜面的投影面积 $A_b = 0.911 \text{ 米}^2$, 锅的直径 0.22 米 , 锅的高度 0.13 米 , 锅的壁厚 0.0015 米 , 锅底面积 $a_b = 0.038 \text{ 米}^2$, 锅侧、锅盖的面积 $a_r = 0.128 \text{ 米}^2$, 锅底的吸收系数 $\alpha_b = 0.95$, 锅底的发射系数 $\epsilon_b = 0.95$, 锅侧、锅盖的发射系数 $\epsilon_r = 0.15$ 。

(2) 给定风速、环境温度和介质的温度, 从方程(7—9)得到 Q_{Lr_2} 和 Q_{Lh_2} 。

(3) 假定锅底内壁温 $T_{w1(0)}$, 对于物性参数 λ_L 、 β 、 P_r 、 ν 与定性温度的关系, 可由拟合曲线作出适合计算的方程, 从方程(10)得到 h_L , 从方程(2)、(3)得:

$$h_L (T_{w1} - T) = \frac{\lambda}{\delta} (T_{w2} - T_{w1})$$

$$\text{即} \quad T_{w2} = T_{w1} + \frac{\delta h_L}{\lambda} (T_{w1} - T) \quad (18)$$

从方程(5)、(6)便可得到 Q_{Lr_1} 、 Q_{Lh_1} 。

(4) 给定太阳直射辐射强度 I_b , 从方程(4)得到 Q_s 。

(5) 从方程(1)得到有用热量 Q_u 。从方程(2)得到 $T_{w1(1)}$, 若 $T_{w1(1)} \neq T_{w1(0)}$, 则按 $T_{w1(1)}$, 重复步骤 3—5, 当 $T_{w1(n)} = T_{w1(n-1)}$ 时, 则可从方程(12)得到热效率 η 。

2. 锅侧、锅盖有绝热层时

若在锅侧、锅盖上包有软质泡沫塑料(20 毫米厚), 其导热系数 $\lambda_1 = 0.04$ [千卡/米·小时·K], $a'_r = 0.144 \text{ 米}^2$ 。并假定绝热后的发射系数不变, 则只要把上述计算步骤(2)中的方程(7—9)用方程(15—17)代替即可。

若锅底采用选择性涂层, 则只要把锅底表面的光学参数改变为选择性涂层的光学参数, 就可进行上述计算了。

模拟实验中采用的工作介质为水。

三、计算机模拟实验结果及分析

不同日照、风速与环境温度下, 太阳灶热效率的计算结果示于图 1 和图 2。

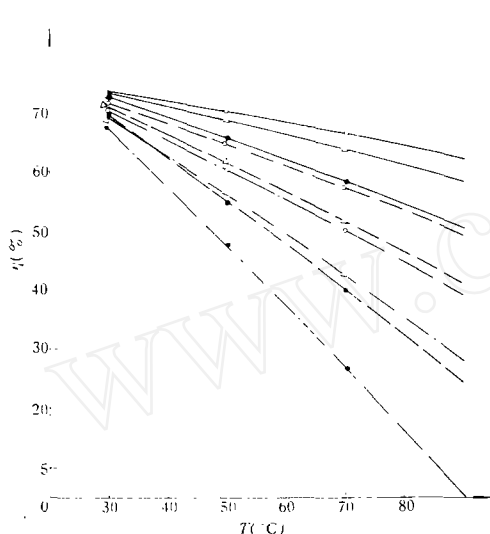


图 1 不同日照、风速下太阳灶热效率与锅内水温的关系(锅侧和锅盖无绝热)

直射辐射: ● 400 千卡/小时·米², △ 600 千卡/小时·米², ○ 800 千卡/小时·米²;
风 速: —— 0.35 米/秒, - - - - 3 米/秒, - · - 5 米/秒;
环境温度 25°C

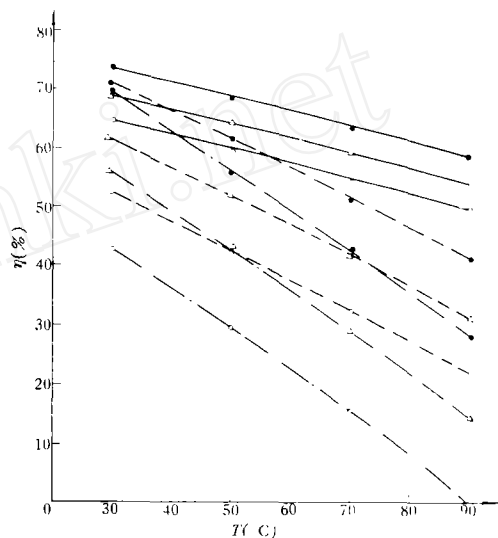


图 2 不同环境温度、风速下太阳灶热效率与锅内水温的关系(锅侧和锅盖无绝热)

环境温度: ● 25°C, △ 5°C, ○ -15°C;
风 速: —— 0.35 米/秒, - - - - 3 米/秒, - · - 5 米/秒
直射辐射 600 千卡/米²·小时

从图 1、2 可以看出, 效率曲线接近一条直线。随着工作介质温度的升高, 太阳灶热效率下降, 日照、风速、环境温度对太阳灶热效率有明显的影响。日照越强、环境温度越高、风速越小, 太阳灶热效率越高。锅侧和锅盖无绝热层时, 风速对太阳灶热效率的影响相当大, 在环境温度低时, 更为明显。

为了消除环境温度、日照对太阳灶热效率曲线的影响, 与太阳能平板集热器瞬时效率曲线的整理方法相类似, 可作 $\eta - \frac{T - T_a}{I_b}$ 曲线, 模拟实验结果如图 3 所示。图 3 表明, 在某一风速下的不同日照和不同环境温度下的效率值都落在同一条效率曲线上, 显然风速的影响与图 1 和图 2 相同。

锅侧和锅盖采用 20 毫米厚泡沫塑料绝热时, 太阳灶热效率的模拟实验结果如图 4 所示。曲线表明, 绝热对于太阳灶工作在较高温度时的效率有较大的改进。

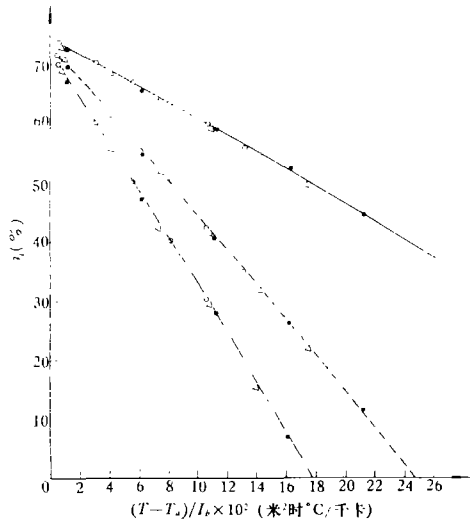


图3 太阳灶热效率曲线(锅侧和锅盖无绝热)
 直射辐射: ●400千卡/米²·小时, △600千卡/米²·小时, ○800千卡/米²·小时;
 风 速: ——0.35米/秒, -----3米/秒, -·-·-·5米/秒

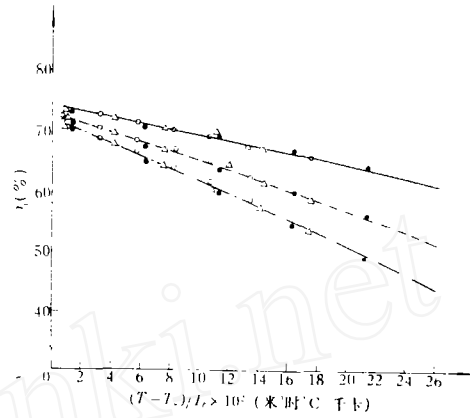


图4 太阳灶热效率曲线(锅侧和锅盖绝热)
 直射辐射: ●400千卡/米²·小时, △600千卡/米²·小时, ○800千卡/米²·小时;
 风 速: ——0.35米/秒, -----3米/秒, -·-·-·5米/秒

锅侧和锅盖采用20毫米厚泡沫塑料绝热,同时锅底采用 $\alpha=0.95$ 、 $\varepsilon=0.15$ 的选择性涂层时,模拟实验结果如图5所示。由图5可见,选择性涂层使高温下工作的太阳灶的热效率有所提高。

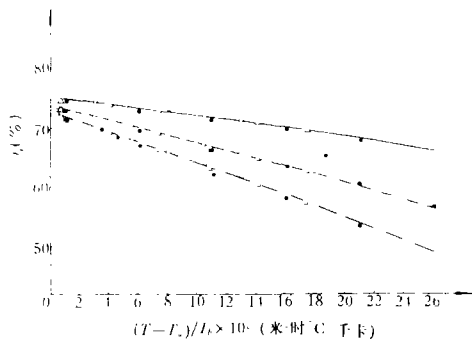


图5 太阳灶热效率曲线(锅侧、锅盖绝热;锅底采用选择性涂层, $\alpha=0.95$ 、 $\varepsilon=0.15$)
 直射辐射: ●400千卡/米²·小时, △600千卡/米²·小时, ○800千卡/米²·小时;
 风 速: ——0.35米/秒, -----3米/秒, -·-·-·5米/秒

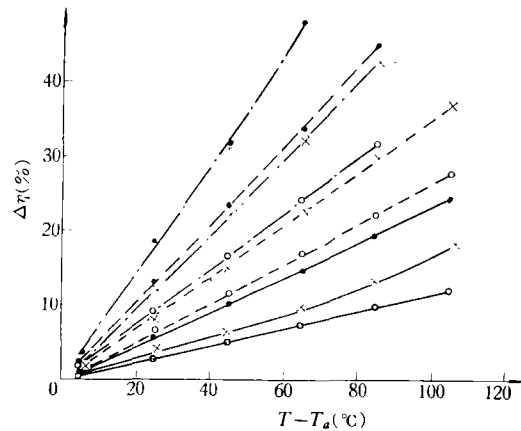


图6 锅侧和锅盖绝热对提高太阳灶热效率的作用
 直射辐射: ●400千卡/米²·小时, ×600千卡/米²·小时, ○800千卡/米²·小时;
 风 速: ——0.35米/秒, -----3米/秒, -·-·-·5米/秒

从图 6 可以看出, 即使风速在 0.35 米/秒情况下, 在低日照(400 千卡/米²·小时)与温差为 100℃时, 绝热仍可提高 23% 的热效率。因此, 太阳灶在冬天工作时, 必须采取绝热措施。

图 7 表明, 选择性涂层在低日照时使用更有效。但总的看来, 它对提高太阳灶热效率的贡献不大。从上述曲线中看到, 太阳灶热效率曲线的斜率绝对值比平板集热器效率曲线的斜率绝对值小得多。这是由于太阳灶的吸热面积与散热面积比接收阳光面积小得多的缘故, 它也是选择性涂层对提高热效率贡献不大的原因。

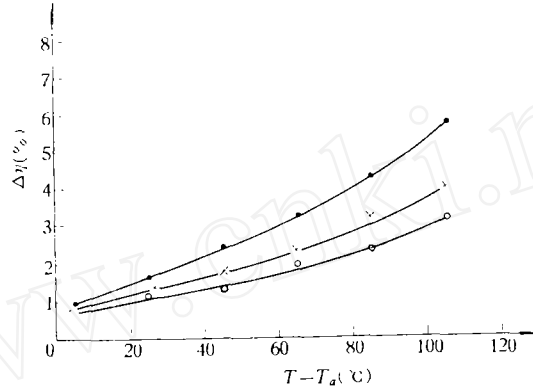


图 7 锅底采用选择性涂层对提高太阳灶热效率的作用

直射辐射: ●400 千卡/米²·小时, ×600 千卡/米²·小时, ○800 千卡/米²·小时;
风速: 0.35 米/秒, $\alpha = 0.95$, $\varepsilon = 0.15$

四、用瞬态法确定太阳灶的瞬时效率曲线

太阳灶热效率可表示为

$$\eta = \frac{\int q_u d\tau}{\int I_b A_b d\tau} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} GC dt}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} I_b A_b d\tau} \quad (19)$$

为了得到瞬时效率曲线, 应选定较短的时间间隔进行测量, 在此瞬时间隔内太阳灶热效率可由下式计算:

$$\eta = \frac{(\bar{i}_e - \bar{i}_i)G \cdot C \cdot 60}{\bar{I}_b A_b \tau} \quad (20)$$

式中, G ——工作介质的重量(公斤), C ——工作介质的比热(千卡/公斤·℃), \bar{i}_e ——工作介质的平均终温(℃), \bar{i}_i ——工作介质的平均初温(℃), \bar{I}_b ——测量瞬时间隔内的平均太阳直射辐射强度(千卡/米²·小时), A_b ——太阳灶镜面的投射面积(米²), τ ——从 \bar{i}_i 加热到 \bar{i}_e 的时间(分)。

同时还需测定环境温度与风速。

实验测定与模拟计算采用相同的太阳灶, 如图 8 所示。为便于比较计算与实验的结果, 在锅底焊了 5 对热偶, 在锅内布置了 8 对热偶, 如图 9 所示。温度测量仪表是国产的 PF-3 型数字电压表, 配有 LY-4 型数字打印机, 它可以快速打印瞬时温度的变化。太阳直射辐射

强度、风速与锅的温度测量同时进行。图 10 为太阳灶测试系统示意图。实用中太阳灶有时在 100°C 以上工作，因此，我们采用水与 3 号机油作为太阳灶的工作介质。

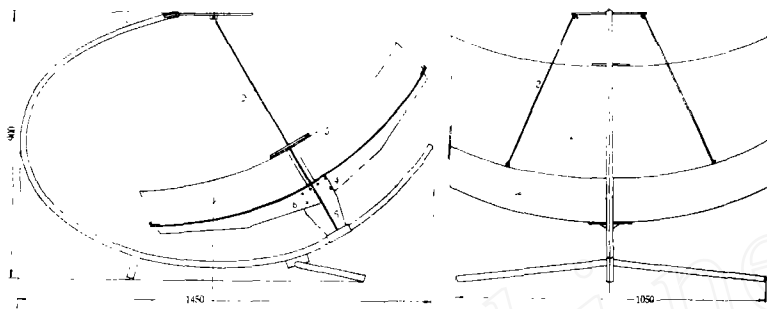


图 8 凹面玻璃太阳灶

1. 支架 2. 挂钩 3. 镜面 4. 螺丝(M5×10) 5. 翼片蒂 6. 翼片

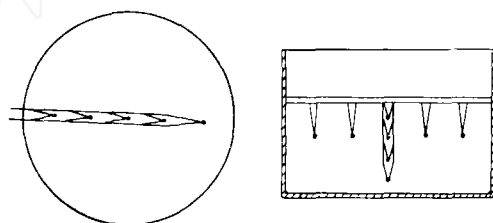


图 9 锅内、锅底热偶分布示意图

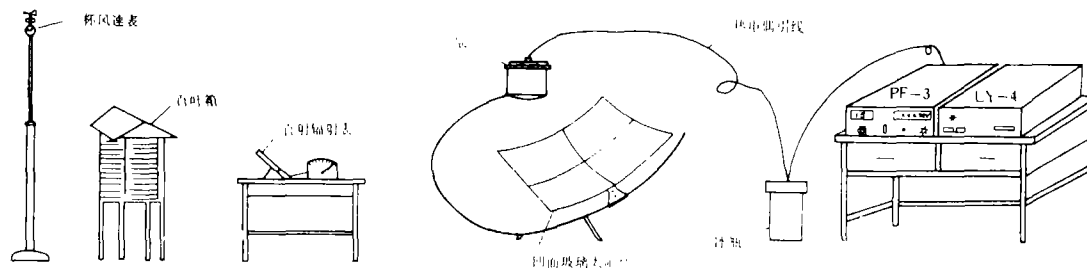


图 10 太阳灶测试系统示意图

五、实验结果及分析

锅侧和锅盖无绝热时测得的瞬时效率曲线如图 11 所示。实验表明，直射辐射强度在 $453-756$ [千卡/米²·小时] 范围内，自然风速在 1.9 米/秒以下。实验数据的离散度是不大的，说明理论分析及用瞬态方法测定反射聚光太阳灶的瞬时效率曲线是可行的。模拟风速实验表

明,非绝热时风速对效率曲线影响较大;图 12 为锅侧和锅盖有绝热层时的实验结果,其效率曲线的斜率绝对值从 5.69 下降到 1.75 [千卡/米²·小时·℃]。这说明绝热是提高太阳灶热效率的一项重要措施。图 11 和图 12 都说明实验值与计算值在“效率曲线”的截距上是基本相符的,但其实验曲线斜率的绝对值大于斜率计算值。这是由于采用文献[6、7]给出的公式,来计算风速对于锅产生的对流换热系数偏低造成的。需要进一步研究解决。

采用 3 号机油为实验工质,在锅侧、锅盖有绝热层时测得的效率曲线如图 13 所示。图 13 表明,采用 3 号机油作工质与水作为工质基本相同,但太阳灶锅内油温一直可达到 150℃ 左右,扩大了实验范围,说明瞬时效率曲线在 150℃ 以下均适用。

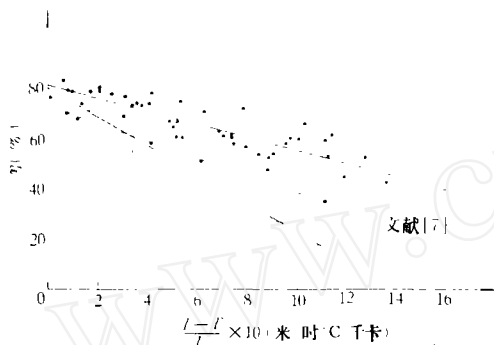


图 11 凹面玻璃太阳灶热效率曲线(锅侧、锅盖无绝热)

- 直射辐射 453—765 千卡/米²·小时, 风速 0—1.9 米/秒, 环境温度 26—31.6℃
- 直射辐射 432—596 千卡/米²·小时, 模拟风速 2.8 米/秒, 环境温度 29.5—32.5℃
- 实验值 - - - - - 计算值(风速为 2.8 米/秒)

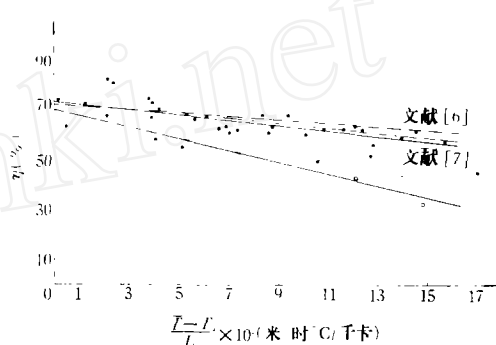


图 12 凹面玻璃太阳灶热效率曲线(锅侧、锅盖有绝热)

- 直射辐射 403—538 千卡/米²·小时, 风速 0—1.7 米/秒, 环境温度 30—33℃
- 直射辐射 445—591 千卡/米²·小时, 模拟风速 3.0 米/秒, 环境温度 27—30℃
- 实验值 - - - - - 计算值(风速为 3 米/秒)

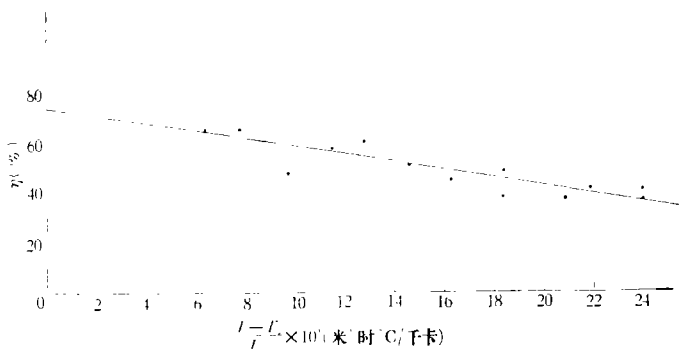


图 13 凹面玻璃太阳灶热效率曲线(3 号机油、绝热)

- 直射辐射 408—523 千卡/米²·小时, 风速 0—2.2 米/秒, 环境温度 29—37℃

六、结 论

实验表明,经计算机模拟实验后提出的反射聚光太阳灶的瞬态瞬时效率曲线的测定方法是可行的。

“效率曲线”的截距,实验值与计算值基本相符。由实验所得的斜率的绝对值,高于计算值。

模拟实验中得到的一些结果,如锅侧、锅盖的绝热措施与锅底采用选择性吸收涂层,对提高太阳灶热效率的作用的结论是合理的。

本实验工作由周嗣京、陈素萍、冯学善同志完成。

参 考 文 献

- [1] 方铎荣、辛定国、林德芳、周嗣京, 新能源, 1980, 2, 51.
- [2] H. P. Garg, H. S. Mann, K. P. Thanvi, Sun Mankind's Future Source of Energy, 1491, (1978).
- [3] Löf, G. O. G., Fester, D. A., and Duffie, J. A., J. Engr. Power, *Trans. ASME*, 84A, 24 (1962).
- [4] Löf, G. O. G., and Duffie, J. A., J. Engr. Power, *Trans. ASME*, 85A, 221 (1963).
- [5] B. A. 卡尔夫, 太阳能利用论文集, 一卷, B. A. 巴乌姆主编, 科学出版社, 189, 1960.
- [6] John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes, JOHN WILEY & SONS, 1974.
- [7] M. A. 米海耶夫, 传热学基础, 高等教育出版社, 1960.
- [8] W. M. Rohsehow and J. P. Hartnett ed., Handbook of Heat Transfer, McGRAW-HILL Book COMPANY, 2-60, 1973.

THE CALCULATIONS AND EXPERIMENTS FOR THERMAL EFFICIENCY OF REFLECTIVE FOCUSING SOLAR COOKER

Fang Duo-rong

(*Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

This paper establishes the mathematical model of thermal efficiency of reflective focusing solar cooker, and proposes the method for calculation. The computer simulation have been accomplished with the solar cooker of concave mirror. According to the results of simulation experiments, this paper proposes measurment method for instantaneous thermal efficiency of reflective focusing solar cooker. The tests have been accomplished. They show that the measurment method is feasible, and the experimental data of intercept of efficiency's curve agree with calculation, but the absolute value of slope taken from the tests is above the calculation one.