

编 号: 0183

科学技术成果报告

太阳能灶具和热水器的有关研究

科学技术文献出版社

目 录

I. 聚光式太阳灶的若干设计问题.....	(1)
一、旋转抛物面聚光太阳灶.....	(1)
二、偏轴抛物面聚光灶.....	(3)
三、折叠式聚光灶.....	(7)
四、抛物柱面聚光箱式灶.....	(8)
五、结束语.....	(9)
II. 太阳能热水器经济特性的研究.....	(10)
一、问题的提出.....	(10)
二、比较的标准和方法.....	(11)
三、现行热水器的技术经济评价.....	(14)
四、边界条件的分析.....	(17)
五、结语.....	(20)
参考文献.....	(20)

太阳能灶具和热水器的有关研究

I. 聚光式太阳灶的若干设计问题

昆明师范学院太阳能利用研究室

一般箱式太阳灶虽具有构造简单,成本低廉,使用方便等优点,但相对而言,因聚光度低,功率有限,箱温不高,只适合于蒸,烤食物,且煮食时间较长,在使用上受到一定限制。聚光式太阳灶利用抛物面聚光的特性,大大地提高了太阳灶的功率和聚光度,锅底处可达 500°C 左右的高温,便于煮,炒食物及烧开水等各种炊事作业,缩短了煮食时间。但聚光式太阳灶较之箱式太阳灶在设计制造方面复杂而成本相应也较高。本文拟对几种类型的聚光式太阳灶在设计制作时的有关问题进行探讨。

一、旋转抛物面聚光太阳灶

聚光式太阳灶的种类虽多,但其原理皆基于利用抛物面镜的聚光特性。所以,我们首先分析太阳光轴向入射到旋转抛物面镜上反射的几何条件,作为下面讨论的基础。我们知道,旋转抛物面的直角坐标方程式为:

$$Z = \frac{1}{4f}(x^2 + y^2) \quad (1)$$

由于对称关系,可以将问题简化为讨论 $\bar{Y}OZ$ 平面的情况。因此,方程式简化为:

$$Z = \frac{y^2}{4f} \quad (2)$$

图1表示轴向入射到某抛物面镜上太阳辐射的反射情况。图中 D 为反射镜的直径, f 为焦距, ρ 为焦点到镜面的矢径, α 为收集角, φ 为误差角, d_0 为焦面上焦象直径, d 为焦象最小直径。

如果太阳光是严格地平行光且镜面是理想的抛物面,反射光应全部聚焦于焦点下。可是由于太阳的径角 $\varphi_0 = 32'$,阳光不是完全的平行光。加之镜面的制造也不能十分准确,因而从镜面上一点反射的光线呈一束张角为 φ 的光锥。由反射镜边缘反射后的光锥在焦面上形成的焦象,决定了焦象的直径 d_0 。由图1按正弦定律得

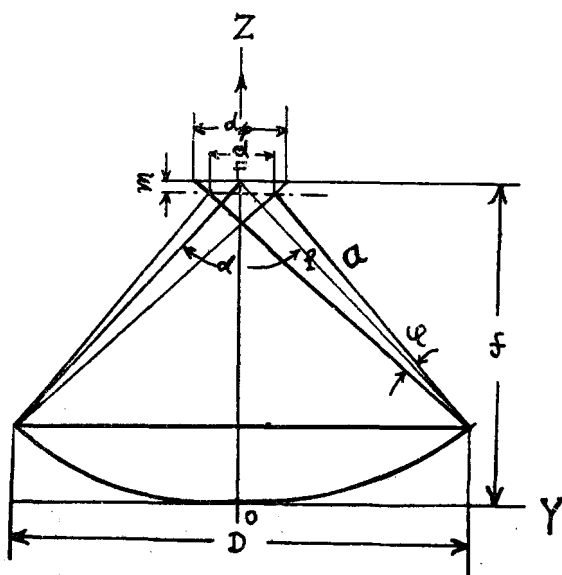


图 1

$$d_{\varphi} = \frac{Z \rho \sin \frac{\varphi}{2}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{D \sin \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

$$= \frac{D}{\sin^2 \frac{\alpha}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} - 1\right)} \quad (3)$$

同理可求得 d 之值,

$$\therefore a = \frac{D \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin \alpha} = \frac{D \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin \alpha}$$

$$\therefore d = 2 \left[\frac{D}{2} - a \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\varphi}{2}\right) \right] = D \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \quad (4)$$

设 $\mu = \frac{d}{D}$, 则

$$\mu = \frac{d}{D} = \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha}$$

式中, 误差角 φ 与抛物面制造的精度有关, 一般为 $1-2^\circ$, μ 与 α 的函数曲线如图 2 所示。由图 2 可知: 当 φ 增大时, μ 增长较快, 对一定的 φ 值而言, α 在 80° 至 100° 范围内, μ 值的变化不大。故设计时, 为了使焦距不要过长, 一般取 $\alpha=100^\circ$ 。

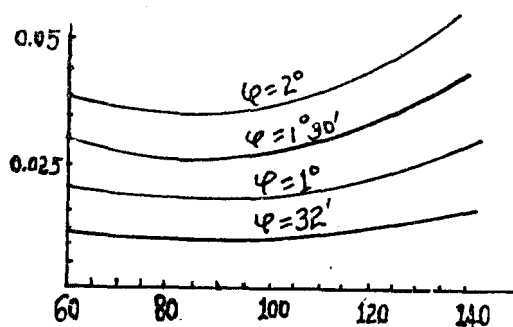


图 2

设聚光度为 C , 则旋转抛物面聚光灶的聚光度为

$$C = \frac{D^2}{d^2} = \frac{1}{\mu^2} = \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi} \quad (5)$$

当 $\alpha=90^\circ$, 对于理想抛物面误差角最小 $\varphi_0=32'$, 此时 μ 值最小。

$$\mu_{\min} = \sin \varphi_0 = 0.00931$$

因此, 旋转抛物面镜聚光度的极值为

$$C_{\max} = \frac{1}{\mu_{\min}^2} = 11540$$

抛物柱面镜的聚光度为

$$C = \frac{D}{d} = \frac{1}{\mu} = \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \quad (6)$$

其极值为

$$C_{\max} = \frac{1}{\mu_{\min}} = 107$$

可见, 抛物柱面镜的聚光度较之旋转抛物面镜要小很多。但由于制造上较容易。所以, 在一般仅要求中等温度工作的情况下, 仍大量采用抛物柱面镜。

d 和 d_{φ} 所在平面间的距离 m , 可由图 1 计算如下:

$$m = \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - a \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

即

$$\frac{m}{D} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \frac{\cos \alpha + \cos \varphi}{\sin \alpha} \right)$$

由于 $\frac{m}{D}$ 之值很小, 故一般把最小焦点面当作焦点面而应用 (4) 式进行计算。

以焦点 F 为原点的抛物面极坐标方程为

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \frac{\alpha}{2}},$$

而

$$\rho = \frac{D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}},$$

所以,

$$f = \frac{D}{4} \frac{1 + \cos \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{D}{4} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4} \quad (7)$$

故抛物线方程可写为下式

$$y^2 = D \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4} \cdot Z \quad (8)$$

以上导出了设计旋转抛物面聚光灶所需的主要公式。具体设计步骤为: (1) 根据所需功率确定抛物面口径 D ; (2) 由所需温度的高低, 焦面的大小, 用 (5) 式确定聚光度 C , 从而决定收集角 α ; (3) 由 D 和 α 利用 (7) 式算出焦距 f ; (4) 根据 (8) 式给出抛物线公式进行制作。

二、偏轴抛物面聚光灶

上面所讨论的旋转抛物面聚光灶, 在用于炊事做饭时, 由于饭锅须始终保持水平, 不能随光轴倾斜。因此, 当太阳高度较高时, 焦面与锅底基本平行, 效果较好。当太阳高度较低时, 焦面与锅底形成的交角较大, 一部分光线射到饭锅的侧面而影响煮食效果。而且, 锅具也无法采用加装保温套的办法, 以减少散热损失, 现以阳光对地的入射角为 45° 的情况来说明, 如图 3 所示, 由抛物面 I 区域来的反射阳光会聚到炊具的侧边, 这部分的太阳能, 不能很好地为炊具利用; 由抛物面 II 区域来的反射阳光, 几乎与锅底平行, 不利于锅底吸收, 利用率低; 由 III 区域来的反射阳光, 会聚到锅底, 而且从 $abcd$ 部分来的反射光, 几乎是直射锅底, 利用率最高。由此可见, 采光面为圆形的太阳灶, 在夏季以及中午使用时, 效果较好。在其他季节以及早晚使用时, 效率就不高。而且, 制作工艺困难, 体形庞大, 不便于携带和放置。针对上述缺点, 郑州三中太阳能小组研制成功了一种将抛物面中 $abcd$ 部分截割下来。

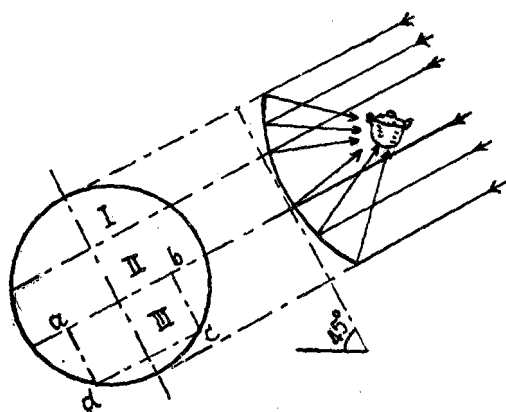


图 3

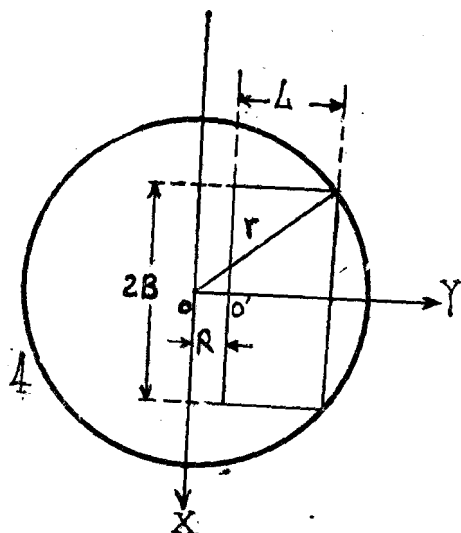


图 4

作为采光面的偏轴抛物面聚光灶。不仅提高了采光效率,而且可以将矩形抛物面对折起来,便于携带和保存。郑州三中太阳能小组,还成功地研究了制作矩形抛物面的方法,工艺简单,成本低,便于推广使用,详情见文献〔4〕,但在设计方面有欠妥之处。现在,根据我们的研制情况,提出有关设计此类太阳灶的几个问题,供研究讨论。

(一) 采光面积S

一般根据所设计的太阳灶的功率确定采光面积S。由于光轴沿OZ轴,故S应在与OZ轴垂直的平面内选取。设 $S = 1 \text{ 米}^2$ 。

(二) 截割抛物面的宽(2B)长(L)比K

设抛物面的半径为r,炊具的半径为R,为了使锅影落于灶外而取 $OO' = R$,下面让我们分析当利用两对平行于OZ轴,并分别与OX轴和OY轴垂直的平行平面来截割抛物面时,如何选择适当的平行面的间距2B与L,使其在满足采光面积S的条件下,抛物面的口径有极小值。如图4所示。

$$S = 2BL$$

$$r^2 = B^2 + (L + R)^2 \quad (9)$$

将(9), (10)两式分别对L求导数,得采光面的极值条件,

$$(10)$$

$$\frac{dS}{dL} = 2B + 2L \frac{dB}{dL} = 0$$

而

$$2L + 2R + 2B \frac{dB}{dL} = 0$$

即

$$\frac{dB}{dL} = -\frac{L + R}{B}$$

代入上式,得

$$K = \frac{2B}{L} = 2 \sqrt{1 + \frac{R}{L}} \quad (11)$$

(11) 式表明, 满足极值条件的宽长比 K , 是 $\frac{R}{L}$ 的函数, 选择适当的 $\frac{R}{L}$ 值, 即可算出 K 值。现选取不同的 $\frac{R}{L}$ 值, 算出一组相应的 K 值如下,

$\frac{R}{L}$	0	0.05	0.1	0.12	0.15	0.18	0.20	0.22	0.25
K	2	2.05	2.098	2.116	2.144	2.172	2.19	2.21	2.24

由此可见, 除 $R=0$ 时, $K=2$ 之外, K 值皆大于 2。由 (9) 式及 (11) 式, 可得

$$L = \sqrt{\frac{S}{K}} \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{KS} = \frac{S}{2L} \quad (13)$$

在计算中, 存在的一个问题是; 由于我们是先估计选定 $\frac{R}{L}$ 值, 用 (11) 式算出 K 值, 再由 (12) 式计算 L 以及 R 。此时, 算出的 R 值与锅具的实际半径一般不符, 须视其相差的大小, 重新再选定适当的 $\frac{R}{L}$ 值, 反复计算两次, 方能使 R 的计算值与实际值更接近。例如,

设 $S=1$ 米², $R=135$ 毫米, 若选择 $\frac{R}{L}=0.1$, 则 $K=2.098$, 此时 $L = \sqrt{\frac{S}{K}} = 690.4$ 毫米, 所以 $R_{\text{算}} = 69.04$ 毫米, 小于 135 毫米, 故应重新选取较大的比值。现再选择 $\frac{R}{L}=0.2$, 则 $K=$

2.19, 此时, $L = \sqrt{\frac{S}{K}} = 675.9$ 毫米, $R_{\text{算}} = 0.2L = 135.2$ 毫米 (与实际值相符), 而 $B = 739.8$ 毫米。并可由 (10) 式算出截割采光面积为 1 米² 所需的抛物面的最小口径 $D=2176$ 毫米。(注意: 这是在选 $R=135$ 毫米的条件下)。

(三) 焦距 f

阳光经所截割成的矩形抛物面反射后, 在焦平面形成的焦象, 约呈扇形, 其对角线 d' , 由图 1 推出如下式:

$$d' = \frac{D}{4} \frac{\sin \varphi}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot (\cos \alpha + \cos \varphi)} \quad (14)$$

与 (4) 式相比较, 在相同的收集角 α 和误差角 φ 的情况下, d' 小于 d 值。故可选取较大的收集角 α , 使得按 (7) 式算出的焦距, 不致于过长。例如, 在我们所举的实例中, 取 $f=800$ 毫米时, 相应的收集角 $\alpha=134^\circ$, 若误差角 $\varphi=2^\circ$, 则按 (14) 式, 得到 $d'=27.1$ 毫米, 焦象并不大。

(四) 箱长 L' 与倾角 α_0

图 5 所示, 为在 $\bar{Y}OZ$ 平面内所截取的抛物线情况。 L' 为太阳灶箱体的长度, α_0 为当太

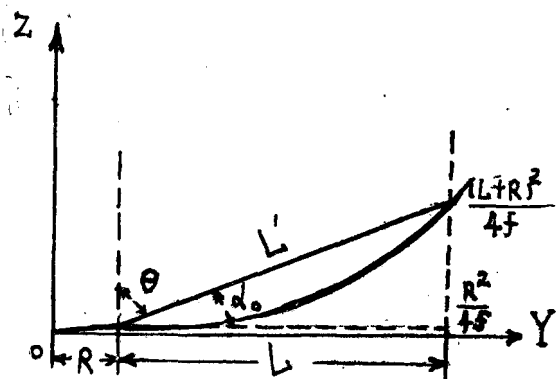


图 5

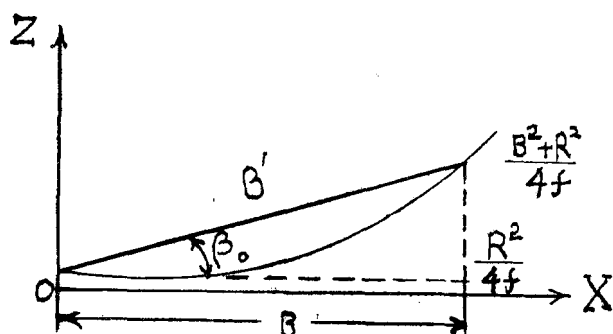


图 6

阳光沿 OZ 轴投射时, 箱体的倾斜角, θ 为太阳光线与箱体的夹角。图中几何关系得

$$\alpha_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{L+2R}{4f} \quad (15)$$

$$L' = \frac{L}{\cos \alpha_0} \quad (16)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha_0 \quad (17)$$

在我们所举的实例中, 由以上三式算得

$$\alpha_0 = 16^\circ 28',$$

$$L' = 704.9 \text{ 毫米},$$

$$\theta = 73^\circ 32'.$$

(五) 箱宽 B' 与倾角 β_0

同理, 如图 6 所示, 在 XOZ 面内, 可求出箱宽 B' 及倾角 β_0 。

如下

$$\beta_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{B}{4f} \quad (18)$$

$$B' = \frac{B}{\cos \beta_0} \quad (19)$$

在所举的实例中, 由上两式算得 $\beta_0 = 13^\circ 1'$, $B' = 759.3$ 毫米。

(六) 箱体厚度 h

图 7 为由旋转抛物面截割而成矩形抛物面的左边一半。下面导出箱体厚度 h 的表达式。抛物面方程式为

$$Z = \frac{1}{4f} (x^2 + y^2)$$

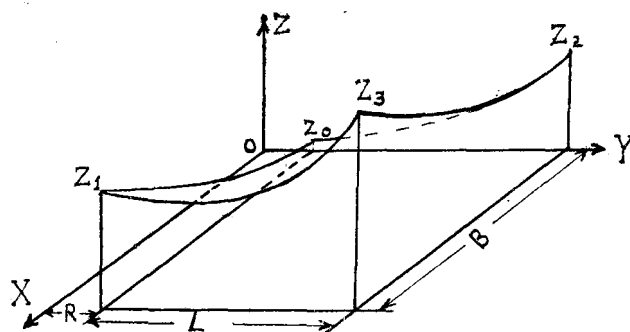


图 7

$$\therefore Z_0 = \frac{R^2}{4f}$$

$$Z_1 = \frac{B^2 + R^2}{4f}$$

$$Z_2 = \frac{(L+R)^2}{4f}$$

$$Z_3 = \frac{B^2 + (L+R)^2}{4f}$$

所以, 过 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 及 Z_3 的平面 (称为顶面) 的方程式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z_1 - Z_0}{B} x + \frac{Z_2 - Z_0}{L} y - Z + \left[Z_0 - \frac{R}{L} (Z_2 - Z_0) \right] &= 0 \\ \text{或} \quad \frac{B}{4f} x + \frac{L+2R}{4f} y - Z - \frac{1}{4f} (LR + R^2) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

此平面的法向量为 $\vec{h} = \left\{ \frac{B}{4f}, \frac{L+2R}{4f}, -1 \right\}$ 。由抛物面方程得抛物面的法向量为 $\vec{h} = \left\{ \frac{2x}{4f}, \frac{2y}{4f}, -1 \right\}$, 因此, 平行于顶面并与抛物面相切的底面, 与抛物面相切点的坐标为

$$x_0 = \frac{B}{2}, y_0 = \frac{L+2R}{2}, z_0 = \frac{1}{16f} [B^2 + (L+2R)^2],$$

两平行面间距即为箱厚 h , 由下式表之:

$$h = \frac{B^2 + L^2}{4 \sqrt{B^2 + (L+2R)^2 + 16f}} \quad (21)$$

在本文所举的实例中算出 $h=73.4$ 毫米。

三、折 叠 式 聚 光 灶

由于旋转抛物面制作困难, 目前也采用许多条长为 L 宽为 B 的长条形抛物柱面镜, 制作成折叠式聚光灶。其优点是设计和加工工艺简单, 灶体轻便。折叠式聚光灶一般用经过电解抛光及阳极氧化处理, 厚度约为1毫米的铝片作为反射镜。每条铝片, 可以很容易地按事先划在纸上的抛物线用手弯成一度弯曲的柱形抛物面, 然后, 将弯好的铝片顺序排成阶梯状安装于箱框上。形成抛物反射面, 使落在每一反光片上的阳光, 都能会聚于锅底。各条镜片的计算及安装原理如下 (图8)。

首先, 选定第一片的焦距 f_1 。则第 n 片的焦距 f_n 为

$$f_n = \frac{f_1}{\cos 2\theta_n} \quad (22)$$

式中 θ_n 可由下式算出

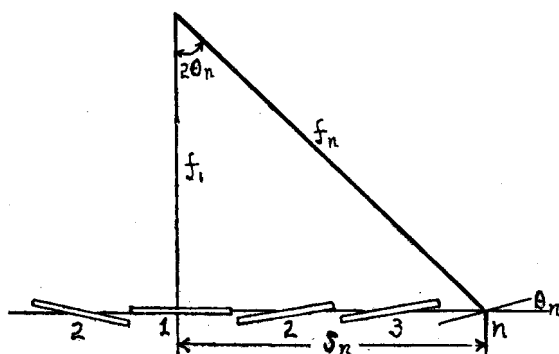


图 8

$$\theta_n = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{S_n}{f_1} \quad (23)$$

上式中, S_n 为第 n 片中心至第一片中心的距离, θ_n 也就是第 n 片的安装角。由于各条镜片的焦距不相同, 因而, 相应的抛物线也各不一样, 但是第 n 片的抛物线方程与第一片的方程, 有一定关系。利用下式, 可以简化计算过程,

$$Z_n = \frac{y^2}{4f_n} = \frac{y^2}{4f_1} \cos 2\theta_n \quad (24)$$

下面利用图 9 导出计算焦象线度的表达式。设条形反射镜的宽为 B , 第 n 片的焦距为 f_n , 安装角为 θ_n , 那么, 阳光由第 n 片反射后, 在焦面的焦象长, 由三部分组成 即 $d_n = d_0 + d_1 + d_2$, 由几何条件得

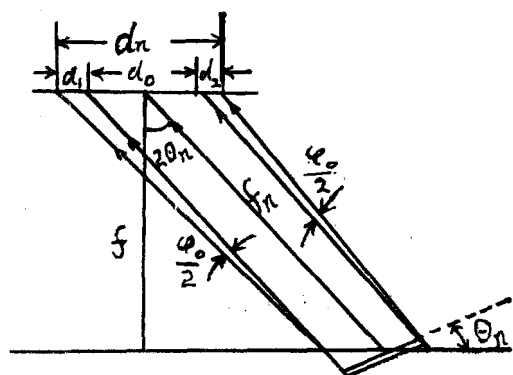


图 9

$$d_n = \frac{B \cos \theta_n}{\cos 2\theta_n} + \sin \frac{\varphi_0}{2} \cdot \left[\frac{f_n + \frac{B}{2} \sin 2\theta_n}{\cos \left(2\theta_n + \frac{\varphi_0}{2} \right)} + \frac{f_n - \frac{B}{2} \sin 2\theta_n}{\cos \left(2\theta_n - \frac{\varphi_0}{2} \right)} \right]$$

将 $f_n = \frac{f_1}{\cos 2\theta_n}$ 代入上式并简化后得

$$d_n = \frac{B \cos \theta_n}{\cos 2\theta_n} + \frac{f_1 \sin \varphi_0 + B \sin^2 2\theta_n \sin^2 \frac{\varphi_0}{2}}{2 \cos^2 2\theta_n - \sin^2 \frac{\varphi_0}{2}} \quad (25)$$

由于 $\varphi_0 = 32'$, $\sin \frac{\varphi_0}{2}$ 之值很小, 故上式中含 $\sin^2 \frac{\varphi_0}{2}$ 的项可以略去。因此有

$$d_n \approx \frac{B \cos \theta_n}{\cos 2\theta_n} + \frac{f_1 \sin \varphi_0}{2 \cos^2 2\theta_n} \quad (26)$$

上式表明 d_n 恒大于 B 值。当 B 和 f_1 选定时, d_n 之值将随 θ_n 增大。而且, 当 θ_n 越大时, d_n 随 θ_n 的增长速度越快。与 d_n 垂直方向的焦象宽度, 可由 (4) 式给出, 其值小于 d_n 。故焦象约呈狭长矩形形状。在设计时, 为了提高聚光度, 宽度 B 应尽可能窄, 并选择较小的收集角 α , 即较长的 f_1 , 灶体做得宽而短一些将较有利。

四、抛物柱面聚光箱式灶

箱式太阳灶由于受窗口面积限制, 接收太阳辐射能的功率较低, 箱温不高, 利用加装平面反射镜, 虽然可以提高聚光度, 从而增加功率和箱温, 但终有限。而且反射镜的利用率低于 50%, 进入箱内的辐射能分散在整个箱体内部和饭盒的上部, 不利于食物的煮食。一般抛物面聚光灶的功率可以设计得较大, 能量集中, 温度高, 但制作困难, 造价高, 不易推广, 且相对于箱式灶而言, 散热损失也较大。

我们在研制各类太阳灶的基础上, 将箱式灶和聚光灶的优缺点加以比较, 吸取两种类型太阳灶的优点研制成功抛物柱面聚光箱式灶。图 10 为太阳灶箱体剖面图。阳光分别由上面箱

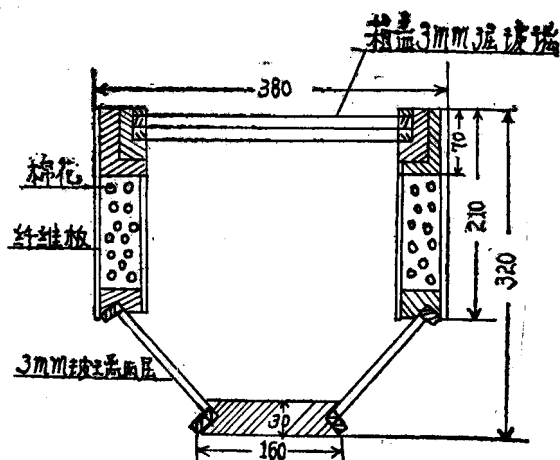


图 10

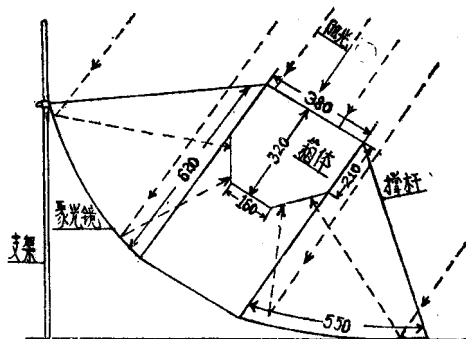


图 11

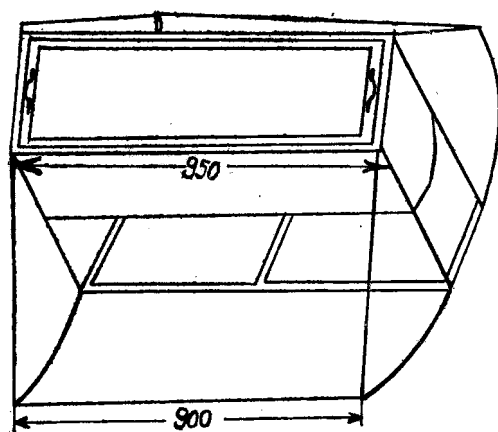


图 12

盖窗口直接入射，和由箱体下面两侧的抛物柱面镜反射聚光后进入箱内，如图11所示。其整体外形结构如图12所示。抛物面用铰链安装在箱体下面的框架上，外侧用活动撑杆与箱体固定。拆去撑杆后，可以将抛物面折叠起来，成为 $950 \times 390 \times 620$ 毫米的箱子，便于放置和携带。长条形箱体内装有挂架，每次可放12个饭盒，比一般箱式灶的容量增加一倍；如果在挂架上放置长条形锅，可以用来煮猪食。我们曾用此灶煮过7公斤半白菜，加半公斤冷水两小时煮熟；如果在挂架上放置圆筒形水箱，则可以用来烧开水，每小时可烧开水3公斤左右；保山县医院用于医疗器械的消毒，效果良好，实践证明，可作为

为医疗站代替高压锅消毒。因此，此种灶具有多种用途的优点。

此种灶之所以具有上述优点，其原因在于采用了抛物柱面聚光使功率较大；箱体较小能量集中，散热损失小，温升快，灶温很容易高达 200°C 以上；太阳辐射能主要由箱体下部两侧的窗口射入，挂架底部的温度最高，便于饭盒或锅中水的对流，有利于食物的蒸煮。

设计时，箱体的内空尺寸，可按所装饭盒的大小及数量，确定挂架尺寸，而沿轴线安置的长条形挂架能在箱体内存自由旋转来决定；由于不过份追求较高的聚光度，故抛物柱面镜的收集角 α 可选得大一些，即焦距 f 短一点，从而使灶体较矮，重心低，使用时稳定性好。

五、结 束 语

本文从抛物面镜的聚光特性及光路的几何条件出发，探讨了几种主要类型聚光式太阳灶的结构特性，并导出相应的计算公式，对设计时所应考虑的因素作了初步分析讨论。文中未涉及跟踪系统和热功计算等方面的问题。

综合本文所述,可得以下几点结论:(1)旋转抛物面镜更适宜作为小型动力源,而作为炊事方面的应用,则以偏轴抛物面聚光灶为佳;(2)对偏轴抛物面聚光灶而言,若令 $R=0$,从本文所写出的有关公式,立即可得出相应的表达式,不仅可以简化设计计算和制造工艺,而且能够提高镜面利用率,所以值得考虑;(3)折叠式聚光灶的设计和制作工艺非常简单,灶体轻便,目前在推广使用方面,主要受抛光铝片价格较高的限制。(4)抛物柱面聚光箱式灶在功率大,箱温高,用途广等方面,较一般箱式灶优越,更适宜在农村推广使用。

(执笔:吕恩荣)

参 考 文 献

- (1) 练亚纯:《太阳能的利用》 北京人民出版社 1975
- (2) B.Б. 温贝尔:《太阳能装置的光学》
科学出版社 1965
- (3) B.A. 卡尔夫:小型太阳能炊事器
《太阳能利用论文集》一卷
科学出版社 1960
- (4) 郑州三中太阳能小组:箱式太阳能聚光灶
《太阳能利用》第一卷第一期
1977. 6月

II. 太阳能热水器经济特性的研究

中国科学院自然资源综合考察委员会

张正敏 辛定国 吉小云 杨富强

一、问 题 的 提 出

太阳能热水器在我国应用已有二十多年的历史。实践证明,这种设备简单易行,维护方便,节省燃料,运行费用很低;但是这种设备的初投资和钢材消耗却很大,比常规能源设备(锅炉)分别高出十至十几倍。如果不考虑污染,这些资金和材料可以用于发展常规能源。因此太阳能热水器的发展前途,取决于它的经济效益大小。

现在,太阳能热水器的应用范围越来越广。使用单位从工厂、农场发展到了机关、学校和服务行业。热水器的采光面积估计已达五万余平方米。在使用地区上,我国东、南、西、北的各大城市甚至部分农村也都开始应用,并在不断地扩大。然而随着部门、行业不同,热负荷特性不同,对热水器的要求亦不同;地区不同,日照、气温及其它能源资源条件也不相同,因而使用热水器的经济效果也不同。

所以,为了经济合理地发展使用太阳能热水器,需要对现行热水器的经济性作出评价,而且需要与常规能源设备做进一步的技术经济比较。

二、比较的标准和方法

正确选定比较对象，确定科学的标准和方法，是技术经济评价和比较的前提。

1. 比较对象

我们知道，影响太阳能热水器经济特性的因素很多，除了与热水器本身的结构、运行情况（集中使用或非集中使用）以及气温、风速、太阳辐射等条件有密切关系外，而且与常规能源的价格、单位发热值、热转换效率有关。这是因为采用热水器的基本目的之一，即在于节省常规能源。如果热水器所替代的常规能源设备转换效率越低，燃料的单位发热值越小，价格越高，热水器的经济性能就越好，反之越差。所以，使用太阳能热水器是否合理，通常以常规能源作为比较对象。

在这里，作为与热水器进行技术经济比较的对象应符合下列条件：

- (1) 具有与热水器相同（或相当）的产热能力；
- (2) 具有与热水器相同（或类似）的使用方向；
- (3) 能够提供与热水器相同（或类似）品质的热源。

从我国的实际使用看，太阳能热水器主要是用来为生产和生活提供40—60℃的热水（如浴池、理发等用热水）。这与热水锅炉的作用基本相同。热水器的采光面积主要取决于负荷的大小，但是常见的热水器采光面积多在100平方米以下。经计算100平方米的太阳能热水器全年的产热量（以北京地区为基础）约相当于容水量为0.5吨的热水锅炉的年产热量。因此，本文关于热水器经济特性的讨论均限于这样一个范围，并均以小型燃煤热水锅炉为比较对象。

但由于负荷特性不同，使用的方案亦不同。按实际使用情况大致可划分为这样两种方案：在要求连续供热时，太阳能热水器需配以相同生产能力的热水锅炉，这样即形成太阳能——锅炉的联用方案与单一使用锅炉的方案；在允许间断供热时，太阳能热水器可以单一运行，这样又形成单一使用热水器与单一使用锅炉的比较方案。关于具体的计算和比较，后文将会谈到。

2. 标准和计算方法

热水器经济性能的好坏，可利用“净收入”多少这一指标作为衡量标准。所谓“净收入”，就是总产值扣除总消耗后所剩下的部分。净收入愈多，经济性愈好；净收入愈少，经济性愈差。因此，只要确定了热水器的净收入数值，然后同常规能源设备比较，即可确定热水器方案是否经济合理。

现假定热水器和燃煤热水锅炉的年负荷完全相同，热水器在其使用年限（ n ）内所提供的总产值为 A_1 元，热水锅炉在相同的年限内提供的总产值为 A_2 元，相应的费用消耗分别为 G_1 和 G_2 元，根据净收入的定义，则热水器的合理条件为：

$$A_1 - G_1 \geq A_2 - G_2 \quad (1)$$

由于负荷完全相同，热水器和热水锅炉所提供的热源品质基本相当，因此 $A_1 = A_2$ 。(1) 式可简化为：

$$G_1 \leq G_2 \quad (2)$$

G_1 、 G_2 由两部分费用构成。一为装置的基本投资费用，包括设备材料、制造和安装等费用；一为年运行费用（不包括基本投资折旧费用），如每年消耗的燃料费（对于太阳能热

水器此项等于0)、装置的维护保养费以及人员工资等费用。

(2) 式清楚地说明, 重要的问题在于正确确定 G_1 和 G_2 。而 G_1 和 G_2 的大小与负荷的特点, 或者与方案的组成有直接的关系。下面分别予以研讨。

(1) 连续供热

鉴于太阳能资源的不稳定性和间断性, 为了确保用户的需要, 采用太阳能热水器供热, 必须同时考虑相应的储能系统或其它的辅助加热措施, 以保证夜晚、阴雨天及冬季对热能的需要。国外常见的方式是热水器与电加热联合使用。我国目前比较现实的办法则是与锅炉联合使用。因此便产生了以上所谈的第一类方案。

在这种情况下,

$$G_1 = C_s + Z_s + C_b + Z_{b1} \quad (3)$$

$$G_2 = C_b + Z_{b2} \quad (4)$$

式中:

C_s ——太阳能热水器在其使用年限内累计的基本投资总额, 元。

Z_s ——太阳能热水器在其使用年限内所支付的全部运行费用, 元。

C_b ——与热水器生产能力相当的燃煤热水锅炉在相同的使用年限内累计基本投资费用, 元。

Z_{b1} ——与热水器配合使用的燃煤热水锅炉在相同使用年限内所支付的全部运行费用, 元。

Z_{b2} ——与热水器生产能力相当的燃煤热水锅炉, 单一使用时, 在相同的使用年限内所支付的全部运行费用, 元。

将(3)、(4)式代入(2), 得

$$C_s + Z_s + C_b + Z_{b1} \leq C_b + Z_{b2}$$

即:

$$C_s + Z_s \leq Z_{b2} - Z_{b1} \quad (5)$$

(5) 式中, 太阳能热水器在使用年限(n)内的全部投资费用, 考虑时间因素的条件

下为:

$$C_s = FC(1+\gamma)^n \quad (6)$$

同样的道理, n 年内热水器所消耗的总运行费用为:

$$Z_s = KFC \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \quad (7)$$

(此式的推导过程略)

(5) 式的右端, 即 $(Z_{b2} - Z_{b1})$ 实际上就是利用太阳能热水器所节省的燃煤费用(ΔZ), 它可用下式计算:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \sum_{i=1}^n \frac{\beta E \eta_s F}{Q_H^p \eta_b} \times P \\ &= \frac{\beta E \eta_s F P}{Q_H^p \eta_b} \times \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \end{aligned} \quad (8)$$

将(6)、(7)、(8)式代入(5)式, 得

$$FC(1+\gamma)^n + KFC \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \leq \frac{\beta E \eta_s F P}{Q_H^p \eta_b}$$

$$\times \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \quad (9)$$

式中:

E ——太阳总辐射强度, 大卡/年·米²

β ——太阳辐射能的可利用系数。我们是这样定义的:

$$\beta = \frac{\text{日平均气温} > 0^{\circ}\text{C 的年晴天日照总辐射}}{\text{全年太阳的总辐射}}$$

所以作这样的规定, 主要基于目前我国太阳能热水器的实际技术状态。它的取值随地区不同而变, 详见表 2。

F ——太阳能热水器的采光面积, 本文以 100 米² 为计算标准, 米²。

η_s ——太阳能热水器系统的平均转换效率, %。

Q_R^H ——热水锅炉燃用煤的低位发热量, 大卡/公斤。

本文为简化计算, 假定各地不变, 均按 5000 大卡/公斤计。

η_b ——热水锅炉的平均热效率。据调查这类锅炉热效率很低, 本文为简化计算, 假定各地不变, 均按 40% 计。

P ——热水锅炉燃烧发热量为 5000 大卡/公斤煤的价格, 元/公斤。

γ ——资金效果系数。它表示单位资金所获得的纯收入。

C ——太阳能热水器的单位投资费用, 元/米²。

K ——太阳能热水器每年的运行费用占初投资的百分比。根据调查并参阅有关资料估算为 1%。

(9) 式经整理后, 还可写为:

$$\frac{C[(1+\gamma)^n + K \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}]}{\frac{\beta E \eta_s P}{Q_R^H \eta_b} \times \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}} \leq 1 \quad (10)$$

上式即为评价太阳能热水器使用经济性能的公式。它适用于以锅炉作为辅助加热的供热系统。在我国具有比较普遍的意义。

上式分子表示热水器在 n 年内所消耗的总费用, 分母实质上是热水器在相应的时间里所创造的总价值。因此对于这个式子也可以这样来理解, 即太阳能热水器消耗的总费用能否依靠其节省常规能源来偿还。如果分式的比值等于或小于 1, 则意味着太阳能热水器的全部费用, 可在其使用期内依靠所节省的常规能源来抵偿, 因而是经济合理的, 反之则不经济。

为了简化计算和便于分析比较, 兹将各系数代入 (10), 最后得到:

$$\frac{2000\gamma C \left[(1+\gamma)^n + 0.01 \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \right]}{\beta E \eta_s P [(1+\gamma)^n - 1]} \leq 1 \quad (11)$$

(2) 间断供热

实际生活中存在着大量的间断性的热需要, 如季节性浴池以及某些非连续生产和生活的加热需要等。在这种情况下, 由于不必考虑辅助加热系统而使热水器的经济竞争能力大大提高。此时:

$$G_1 = FC(1+\gamma)^n + KFC \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}$$

$$G_2 = C_b(1+\gamma)^n + Z_b \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}$$

根据(2)式, 则

$$FC(1+\gamma)^n + KFC \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \leq C_b(1+\gamma)^n + Z_b \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}$$

即:

$$FC \left[(1+\gamma)^n + K \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \right] \leq C_b(1+\gamma)^n + Z_b \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \quad (12)$$

上式中:

Z_b ——热水锅炉每年所消耗的运行费用。它可表示为: $D \times \frac{1}{M}$ 。其中 D 为热水锅炉每年所消耗的燃煤费用, M 为燃料费用占运行费用的百分比。根据调查, 容水量在0.5吨以下的热热水锅炉, 燃料费在总运行费用中占的比重很大, 一般为60—70%, 这里按其中值计算。故 $Z_b = 1.5D$ 。而 D 应按热水器每年所产生的热量来计算, 即:

$$D = \frac{\beta FE \eta_s}{Q_H^p \eta_b} \times P$$

这样(12)式变为:

$$FC \left[(1+\gamma)^n + K \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \right] \leq C_b(1+\gamma)^n + 1.5 \frac{\beta FE \eta_s P}{Q_H^p \eta_b} \times \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}$$

将各系数代入上式, 整理后得到:

$$\frac{100C \left[(1+\gamma)^n + 0.01 \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma} \right]}{C_b(1+\gamma)^n + 0.075\beta FE \eta_s P \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma}} \leq 1 \quad (13)$$

上式即为热水器在间断供热条件下使用是否经济的判断式。

三、现行热水器的技术经济评价

1. 应用现状

目前我国常用的两种太阳能热水器的基本技术经济特征以及被热水器所替代的热水锅炉的实际运行情况如表1所示。

表中各项系指全国的一般情况, 其中:

平均热效率——指热水系统的平均效率。目前国内缺乏完整的系统热效率的测试数据, 表中管式热水器的效率指标系根据本组的试验资料及文献(3)、(4), 并参阅文献(2)而估计的。瓦楞式热水器的效率系根据调查材料及文献(5)、(6)、(7)估计的。

年产热量——太阳能热水器按100米²计算, 其中北京地区直管式热水器的产热量为31×

表1 太阳能热水器和热水锅炉的基本技术经济特征

	直管式热水器	瓦楞式热水器	热水锅炉
热盒材料	木材或钢板	钢板	—
复盖层材料	普通窗玻璃	同左	—
玻璃层数	1—2	1—2	—
吸热面涂料	黑板漆、锅灰、沥青等	同左	—
保温材料	矿棉、珍珠岩、锯末、苯板等	同左	—
吸热排管间距 (cm)	10—15	—	—
水循环方式	自然循环	同左	—
使用季节	日平均气温 $> 0^{\circ}\text{C}$	同左	不受季节限制
平均热效率 (%)	30—50	~60	< 40
年产热量 (10^6 大卡/年)	31左右	38左右	30
使用寿命 (年)	> 14	5左右	> 10
钢材消耗 (公斤/米 ²)	49.4	43.7	—
钢材消耗 (公斤/ 10^6 大卡)	160	112	10
基本投资 (元/米 ²)	114	154	—
基本投资 (元/ 10^6 大卡)	367	395	29.40

10^6 大卡/年，上海地区瓦楞式热水器为 38×10^6 大卡/年。热水锅炉按每年运行300天计算。

使用年限——1958年天津大学设计试制的直管式热水器直到1976年地震前夕一直正常运行；1965年北京天堂河农场试制的同一类型热水器迄今还在使用，由此说明这种热水器的寿命是相当长的。瓦楞式热水器的使用寿命系根据调查材料估计。

钢材消耗——每平方米的钢材消耗，直管式热水器根据北京海淀区兰靛厂的产品，并参考标准设计按木盒计算；瓦楞式根据标准设计计算。每百万大卡的钢材消耗，分别根据北京和上海地区实际的太阳辐射资料、热水器的转换效率分别按40%和50%计算。

基本投资——包括集热器、水箱、支架及其安装费用等。直管式热水器的基本投资以兰靛厂的实际成本扣除14%的利润后，再加上支架和安装费用等。瓦楞式热水器的基本投资费用系根据文献(5)。

热水锅炉的各项数据均来源于实际调查。

2. 计算取值

η_s : 直管式热水器按40%、瓦楞式按50%计算；

n : 直管式热水器按20年、瓦楞式按10年计算；

C : 直管式热水器按114元/米²、瓦楞式按154元/米²计算；

P : 北京地区按0.030元/公斤，上海地区按0.035元/公斤计算；

C_b : 均按912计算 (包括设备及制造费用412元，安装及土建费用500元)。

β : 按表2选取。

γ : 根据文献(1)的计算，全国平均为0.15。考虑到太阳能热水器是一种新的转换设备，这里按0.1计算。

3. 计算结果与分析

兹将以上取值分别代入(11)和(13)式，其计算结果列入表3。