

中国科学院广州能源研究所

研究生毕业论文

波纹膜平面接受器的太阳能聚光集热器
理论与实验研究

指导教师: 吴文 研究员

郑振宏 工程师

研究生: 陈洪亮

专 业: 热 能 工 程

一九八五年十二月

本文提出一种带V形透明隔热膜的平板集热器为吸热体,配以复合抛物面为反射面的太阳能中温集热器(简称FPV-CPC集热器)。文中介绍了FPV-CPC集热器的理论与实验研究结果,并进行了比较;阐明了用光线追踪法求出光学效率,反射次数随入射角的变化规律,且考虑玻璃盖板的透过率、吸收面的吸收率随入射角的不同而变化;建立了集热过程的数学模型,通过用松弛迭代法求解四个非线性方程的方法对FPV-CPC集热器的热性能进行了详细的分析;并在太阳能中温集热器测试台上,对这种集热器的主要指标进行了实验测试。结果表明:FPV-CPC集热器在70~110℃的中温范围内工作时性能良好,而且结构简单,加工制作容易,造价低,因此具有实用和推广的价值。



N 81085

一、引言.....	4
二、集热过程的数学模型.....	8
I、光学部分的数学模型.....	8
II、集热器传热数学模型.....	15
三、集热器性能预测.....	30
1、光学效率.....	31
2、在不同的条件下,各部件温度随日照率的变化.....	32
3、热效率.....	34
4、热损系数.....	36
5、热损分析.....	40
6、有效得热.....	41
四、实验装置的描述.....	43
(一)集热器的构造.....	43
(二)实验装置.....	45
五、实验结果.....	50
1、时间常数.....	50
2、瞬时效率.....	51
3、热损系数.....	54
4、日平均效率及入射角对效率的影响.....	58
六、分析比较.....	62
1、实验热效率与理论热效率的比较.....	62
2、实验热损失系数与理论热损失系数的比较.....	62
3、几种中温集热器性能比较.....	63

七、结论.....	66
八、符号说明.....	68
九、参考文献.....	73
十、附录.....	76
A、抛物线方程的推导.....	76
B、入射光线与反射面的交点.....	76
C、反射光线斜率的推导.....	79
D、吸热面，V形膜及玻璃盖板之间辐射换热量的推导...	80
E、计算程序.....	82
(一)光学性能计算程序.....	82
(二)热性能计算程序.....	84
F、理论计算结果.....	92
十一、英文摘要.....	107

由于世界性的能源危机不断出现，促使人们对太阳能的研究与利用更为重视，从而加快了研究步伐、取得了许多进展。在太阳能低温利用领域中、平板型太阳能集热器的产品在美国、日本、法国、澳大利亚等国已经进入商品化阶段，产量正在逐年增长，理论方面的研究也相当成熟。

然而，普通平板集热器的工作温度只能达到 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，在更高的运行温度下，其效率将急剧下降，因此限制了其应用范围。研究工作温度在 $70\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的太阳中温能集热器，将会为太阳能的利用开辟更为广阔的领域，如太阳能空调、太阳能开水器、工业预热等等，这也是本文所要研究的目的。

在太阳能中温应用方面，目前比较多的是采用真空管集热器、蜂窝集热器、具有选择性表面的高性能平板集热器以及聚光型集热器等。真空管集热器应用比较理想的选择性涂层、降低了辐射热损失、采用真空隔热技术抑制自然对流，从而提高了集热器的效率和集热温度，即使在有风的冬天，低日照与漫射光的条件下、也具有有良好的集热性能，工作流体温度可达 100°C 以上。目前在美国、日本已将真空管组成的平板型集热器应用于太阳能采暖，空调和工业热水过程的示范，并逐步扩大应用。在国内也已成功地研制了全玻璃真空管集热器[1]和玻璃—金属真空管集热器[2]。真空管集热器虽然具有良好的性能，但由于大直径玻璃管的拉制，金属与玻璃的封接以及高真空等工艺技术问题，提高了这种集热器的造价，因此其应用范围受到一定的限制。

我们知道，要提高集热温度，可以通过减少能量损失来达到，另

一方面，通过加反射面来提高吸热面上的太阳辐射强度，也可以达到这个目的，各种形式的聚光型集热器就是属于这一类型。1974年，R. Winston^[3]提出了复合抛物面的概念，为太阳能中温利用开辟了一条新的途径，引起了太阳能研究人员的兴趣。复合抛物面集热器（简称CPC）是一种非成像的低聚焦度（聚焦比在10以下）的理想聚光器。它是根据边缘光线原理设计的，在接收角范围内可以将光线按理想聚焦比收集到吸收器上（ $C_{\max}=1/\sin\theta_A$ ）。这种集热器的最大优点是具有较大的接收角，所以在运行时不需要连续跟踪，只需根据接收角的大小及每天收集阳光的小时数，每年定期调整若干次，就可以有效地工作，在聚焦比为2以下时，可做成固定式装置。因此整个集热器结构比较简单。这种集热器不仅可以接收直射辐射和一部分散射辐射，而且还能接收一般跟踪式聚光器所不能接收到的“太阳周围辐射”。复合抛物面集热器可根据不同形状的吸收器进行设计，吸收器既可做成横放平面，竖放平面，也可以做成圆柱形^[4]。此外，反射面既可以由一条抛物线复合而成，也可以由两条或三条抛物线复合而成^[5]，对反射面的制造和安装精度要求不高，这样在应用方面，可以很方便地同各种形状的吸收面，尤其是平板型和圆柱真空管型配合使用。适用于工作温度在100~200℃的中温范围，因此，CPC装置对于驱动太阳能空调、工艺用热、全能系统、冬季气温低的地区取暖、供应开水等具有特殊的作用。

自Winston提出CPC后，美国国立阿贡实验室对这种集热器进行了许多理论与实验研究，发表了一些文章^[6~11]，1981年FLORIDA大学工程系的C.K. HSIEN对CPC集热器进行了理论分析^[12]。在国内，中科院广州能源研究所对带真空管吸收器的CPC集热器进行了一系列的研究，结果表明：从常温到150℃的中温范围

内具有良好的性能 [13, 14], 此外华中工学院 [15, 16] 和重庆大学 [17] 也对 CPC 集热器进行了许多研究。

平板集热器具有制造简单、价格便宜的优点, 但由于在吸收面与盖板之间存在着较大的对流损失, 因此限制了其工作温度。为了减小对流损失, 国外许多学者做了大量研究工作。在七十年代, Hollands [18] 和 Baldwin 等 [19] 就提出通过使用合理设计的蜂窝可以抑制自然对流和辐射损失, 从而提高集热温度。国内外不少研究人员都对蜂窝集热器进行了理论和实验的研究 [20~22], 证明这种集热器确实可以应用中温范围。不过蜂窝集热器的制作工艺较复杂, 特别是玻璃蜂窝, 因此, 成本也较高。

近两年, 在日本出现一种新型的高性能平板集热器, 即所谓带 V 形透明隔热膜 (TVI) 与选择性表面的平板集热器。与双层盖板集热器相比, 这种集热器具有更高的太阳能透过率, 在抑制自然对流方面, 可以与蜂窝集热器媲美, 而且制造工艺简单, 价格便宜, 在 75°C 工作温度下, 效率比一般的平板集热器高 37% [23]。在带 TVI 的平板集热器中, 透过玻璃而被膜反射的太阳光不会被反射掉 (见图 1), 所以其透过率比双盖层系统大。又由于 V 槽将波纹板与玻璃间的空气隔成小空间, 因而抑制了自然对流损失。

本文所研究的集热器是以带 V 形透明隔热膜的平板集热器为吸热体, 配以复合抛物面聚光器为反射器, 其原理图如图 2 所示。

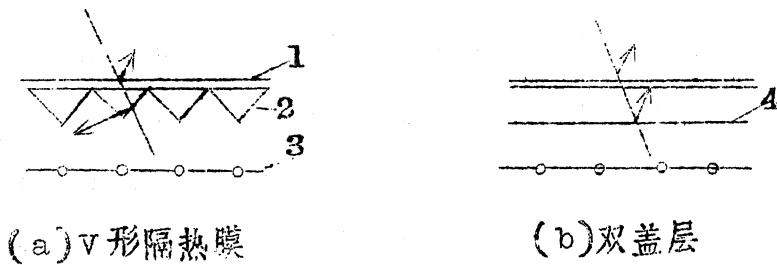


图1 对入射光反射情况的比较

1—玻璃盖板 2—V形膜 3—吸热板 4—平板形膜

1—CPC反射面
2—玻璃盖板
3—V形隔热板
4—吸收面

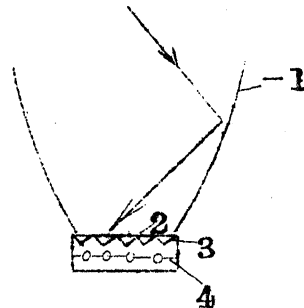


图2 FPV—CPC集热器示意图

这种集热器能将工作流体温度提高到 $70\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的中温范围，因此可用于驱动太阳能空调，工艺用热、全能系统、供应开水等。与真空管集热器相比，虽然效率低，但其成本显著下降，而且可以利用已经进入商品化的平板集热器，因此，对于推广应用将具有现实意义。

二、集热过程的数学模型

I、光学部分的数学模型

对于聚焦式太阳能集热器来说，决定光学性能的因素很多。除了聚光器的线型、聚焦比以及截短比外，许多随太阳光对集热器入射角不同而变化的量对光学性能都有很大的影响。这些量包括：1) 盖板的透过率随入射角的变化；2) 反射面的反射损失；3) 选择性表面的吸收率随入射角的变化；4) 由于吸收面的吸收率小于1，而使入射到其上的光线有一部分反射出去，这些光线或者又反射回吸收面或者反射出去而损失；5) 集热器端头的影响，该因素的影响取决于光线对吸收面的详细辐射情况，需分别处理每条光线。

在实际工程应用中，一般是以光学效率这个综合参数来衡量集热器的光学性能。所谓集热器的光学效率是指在吸收面上接收到的太阳光总能量与入射到集热器光孔上的太阳光总能量之比。对于复合抛物面集热器，其光学效率一般可以表示为 [12]：

$$\eta_o = \delta \bar{\tau}_g \rho_m \bar{n} \bar{\alpha}_p f \quad (1)$$

式中： $\delta = [I_{bc} + I_{dc}/CR]/I_{tc}$ ——接受因子，定义为集热器所能接受的太阳总辐射的百分比。

$\bar{\tau}_g$ ——玻璃盖板的平均透过率。

$\bar{\alpha}_p$ ——吸收面的平均吸收率。

ρ_m ——反射面的反射率。

\bar{n} ——光线到达吸收面所经过的平均反射次数，可用光线追踪法计算，对于反射面线型简单的集热器也可用分析方法求得 [8]。

f ——光线在集热器内多次反射的校正因子。

以上各个量，除 δ 外都是随光线入射角的不同而变化的，在工程上，通常用它们的平均值来计算集热器的光学效率。

式(1)的特点在于计算简单，使用方便，但它却不能反映光线的入射角对光学效率的影响。要精确地计算光学效率，详细地了解光学效率随光线入射角及其他因素的变化而变化(本文这种集热器，光线在盖板上的入射角变化较大)，特别是考虑光线的多次反射效应及集热器的端头影响时，就只好用光线追踪法跟踪每一条光线，只要我们将光线分得足够多，就能够得到足够精度的光学效率，借助于高速计算机，使跟踪上万条的光线成为可能。

下面我们就用光线追踪法求光学效率和反射数，首先建立数学模型，为了使推导和计算不至于太繁琐，需要做一些简化假定：

1) 反射面为理想镜面。一束光线射到金属表面时，由于表面存在缺陷，因此总有两种反射，一种是镜反射，另一种是漫反射。对用于制作聚光式集热器反射面的材料，在太阳光波范围内，镜反射要比漫反射大得多。为了简化起见，我们不考虑漫反射作用，而认为表面是理想镜面，入射全部以镜反射形式反射出去。

2) 聚光反射面的线型是理想的，即不考虑加工与安装上的误差。

3) 由于金属材料的反射率在入射角很大的范围几乎没什么变化[24]，因此可以假定反射率不随入射角而变化，并取太阳光波长范围的平均值。

4) 光线射到玻璃上，要产生反射与透射损失，而且随着入射角的不同，损失也不一样，假定这种损失遵守菲涅尔定律。

5) 由于V形槽的作用，可假定光线射到V形膜时不产生反射，而只有透射损失。(见图1)

6) 由于吸收面的吸收率小于1, 所以入射光线有一小部分被反射出去, 反射出的光线不一定损失掉。但对于吸收率大的表面, 这一部分反射光是很小的, 因此下面推导中不予考虑。

7) 吸收面的吸收率随入射角的不同而变化, 其变化规律非常类似于玻璃的透过率随入射角的变化 [25], 因此可以假定吸收率随入射角的变化规律与玻璃透过率的变化规律相同。

有了上述假定后, 就可以建立数学模型。

如图3所示, 反射面在 xOy 坐标系的方程可表示为 [详细推导见附录A]。

$$A_1x^2 + A_2y^2 + A_3xy + A_4x + A_5y + A_6 = 0$$

(2)

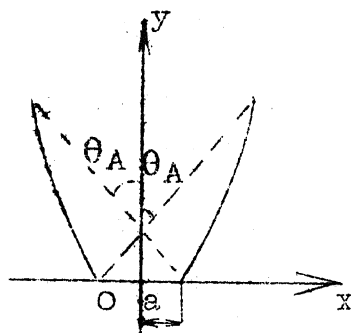


图3

对于右边抛物线方程:

$$A_1 = \cos^2 \theta_A; A_2 = \sin^2 \theta_A; A_3 = \sin 2\theta_A;$$

$$A_4 = 2U \cos \theta_A + 4f \sin \theta_A;$$

$$A_5 = 2U \sin \theta_A - 4f \cos \theta_A; A_6 = U^2 - 4fV$$

对于左边抛物线方程: $A_1 = \cos^2 \theta_A; A_2 = \sin^2 \theta_A; A_3 = -\sin 2\theta_A;$

$$A_4 = -2U \cos \theta_A - 4f \sin \theta_A;$$

$$A_5 = 2U \sin \theta_A - 4f \cos \theta_A; A_6 = U^2 - 4fV.$$

式中:

$$\begin{cases} U = g \cos \theta_A - h \sin \theta_A \\ V = g \sin \theta_A - h \cos \theta_A \end{cases}$$

$$\text{而} \begin{cases} g = f \sin \theta_A - a \\ h = -f \cos \theta_A \end{cases}$$

a —— 吸收面长度的一半

θ_A —— 反射面的接收半角

$f = a(1 + \sin \theta_A)$ —— 抛物线焦距

用光线追踪法求光学效率、反射数，必须将光孔分成若干个小段区间（本文将光孔分成186个小段区间），每个区间的太阳光用位于该区间中间的一条光线代替，其能量等于该区间的太阳能，而入射角等于太阳光入射角。通过这样离散处理后，就可以用有限条光线代替均匀照射在光孔上的太阳能，然后分别求出每条光线到达接收器时，有多少能量被吸收，以及到达接收器前所经过的反射次数，最后把它们各自加起来，除以入射在光孔上的太阳能量、光线条数，就得到光学效率和反射数。

设 X_i 为某条光线入射点的横坐标、 θ_i 为入射角，光线所携带的能量 $I_i = 1$ ，则入射光线可表示为：

$$\begin{cases} y = Kx + B, K = c \operatorname{tg} \theta_i & (\text{不垂直于 } X \text{ 轴}) & (3) \\ x = X_i & (\text{垂直于 } X \text{ 轴}) & (4) \end{cases}$$

对于到达吸收面的光线，可分成两类，一类是不经反射面反射而直接射到吸收面；另一类是经过反射后才到达吸收面。

1、不经反射而直接射到吸收面

$$\text{入射光在 } X \text{ 轴的截距: } \begin{cases} h_i = -B/K & (\text{入射光不垂直于 } X \text{ 轴}) & (5) \\ h_i = X_i & (\text{入射光垂直于 } X \text{ 轴}) & (6) \end{cases}$$

若 $-a \leq h_i \leq a$ ，则入射光线直接到达吸收面

吸收面得到的能量： $I=I_0 \tau_g \tau_v \alpha_p$ (7)

式中： $\tau_g = \frac{1}{2} (\tau_{g\perp} + \tau_{g11})$ (8)

$$\tau_{g\perp} = \frac{(1-\rho_{\perp})^2 e^{-k\delta/\cos\beta_r}}{1-\rho_{\perp}^2 e^{-2k\delta/\cos\beta_r}} \quad (9)$$

$$\tau_{g11} = \frac{(1-\rho_{11})^2 e^{-k\delta/\cos\beta_r}}{1-\rho_{11}^2 e^{-2k\delta/\cos\beta_r}} \quad (10)$$

$$\alpha_p = \alpha_p(0) \frac{\tau_g(\beta_i)}{\tau_g(0)}$$

$$= \alpha_p(0) \left[\frac{(1-\rho_{\perp})}{(1+\rho_{\perp})} + \frac{(1-\rho_{11})}{(1+\rho_{11})} \right] (n_r^2 + 1) / 4n_r \quad (11)$$

τ_v —V形透明隔热膜的透过率

ρ_{\perp} ρ_{11} 分别为光线垂直偏振入射和水平偏振入射时玻璃的反射率。

i) $\theta_i \neq 0$ (此时 $\beta_i \neq 0$) 时

$$\rho_{\perp} = \sin^2(\beta_i - \beta_r) / \sin^2(\beta_i + \beta_r) \quad (12)$$

$$\rho_{11} = \text{tg}^2(\beta_i - \beta_r) / \text{tg}^2(\beta_i + \beta_r) \quad (13)$$

若以 kg 表示光线到达玻璃时的斜率，则

$$\beta_i = \pi/2 - \text{tg}^{-1} |kg| \quad (14)$$

$$\sin\beta_i / \sin\beta_r = n_r \quad (15)$$

ii) $\theta_i = 0$ (此时 $\beta_i = 0$) 时

$$\rho_{11} = \rho_{11} = (n_r - 1)^2 / (n_r + 1)^2 \quad (16)$$

2. 经反射面反射后到达吸收面

(1) 求入射光与反射面的交点

若入射光在 x 轴上的截距 $h_i < -a$ 或 $h_i > a$, 则入射光先到达反射面, 入射光与反射面的交点的详细推导见附录 B

i) 入射角 $\theta_i = 0$ 时, 交点为:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \\ y_1 = (-D_2 + \sqrt{D_4}) / 2D_1 \end{cases}; \quad \begin{cases} x_2 = x_0 \\ y_2 = (-D_2 - \sqrt{D_4}) / 2D_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $D_1 = A_2$; $D_2 = A_3 x_0 + A_5$; $D_3 = A_1 x_0^2 + A_4 x_0 + A_6$;

$$D_4 = D_2^2 - 4D_1 D_3$$

ii) 入射角 $\theta_i \neq 0$ 时, 交点为:

$$\begin{cases} x = -D_3' / D_2' \\ y = Kx + B \end{cases} \quad (D_1' = 0, D_2' \neq 0) \quad (18)$$

$$\begin{cases} x_1 = (-D_2' + \sqrt{D_4'}) / 2D_1' \\ y_1 = Kx_1 + B \end{cases}; \quad \begin{cases} x_2 = (-D_2' - \sqrt{D_4'}) / 2D_1' \\ y_2 = Kx_2 + B \end{cases}$$

$$(D_1' \neq 0, D_4' \geq 0) \quad (19)$$

式中: $D_1' = A_1 + A_2 K^2 + A_3 K$; $D_2' = 2A_2 KB + A_3 B + A_4 + A_5 K$

$$D_3' = A_2 B^2 + A_5 B + A_6; \quad D_4' = D_2'^2 - 4D_1' D_3'$$

以上所求是否是我们要求的交点，应根据下列 3 个条件进行判断：

(A) 是否满足 $M_1 \leq x_{1,2} \leq M_2$ 不满足的应舍去。

$$\begin{cases} N_1 \leq y_{1,2} \leq N_2 \end{cases}$$

对于右抛物面： $M_1=a$ ； $M_2=a_T$ ； $N_1=0$ ； $N_2=h_T$

对于左抛物面： $M_1=-a_T$ ； $M_2=-a$ ； $N_1=0$ ； $N_2=h_T$

(B) 判断交点是否是入射光线的起点，即若 $x_1=x_0$ ， $y_1=y_0$ 或 $x_2=x_0$ ， $y_2=y_0$ ，则 x_1, y_1 或 x_2, y_2 应舍去。

(C) 通过 (A)、(B) 判断后仍有两个交点，则要进行下列判断，即若 $y_1 \geq y_2$ ，则交点为 x_2, y_2 ，否则为 x_1, y_1

以上所述，我们可求得入射光与反射面的交点，并设为 x_0', y_0'

(2) 求反射光线方程

如图 4 所示：

K —入射光线的斜率

K_n —反射面法线斜率

$$K_n = \frac{(2A_2y_0' + A_3x_0' + A_5)}{(2A_1x_0' + A_3y_0' + A_4)}$$

K' —反射光线斜率 (详细推

导见附录 C)

i) 当 $K = \infty$ (即 $\theta_1 = 0$) 时

$$\text{反射光线斜率 } K' = (K_n^2 - 1) / 2K_n$$

(20)

$$\text{截距 } B' = y_0' - K'x_0'$$

(21)

$$\text{反射光线方程 } y = K'x + B'$$

(22)

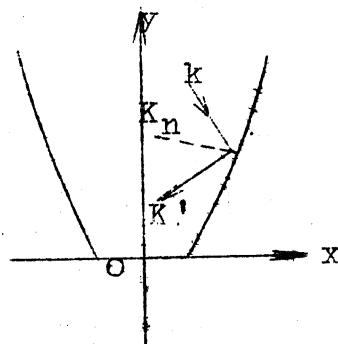


图 4

ii) 当 $K = \text{有限值}$ (即 $\theta_1 \neq 0$) 时

$$\text{反射光线斜率 } K' = (K_n^2 K + 2K_n - K) / (1 + 2K_n K - K_n^2) \quad (23)$$

$$\text{截距 } B' = y'_0 - K' x'_0 \quad (24)$$

$$\text{反射光线方程 } y = K' x + B' \quad (25)$$

iii) 当 $1 + 2K_n K - K_n^2 = 0$ 时

$$\text{反射光线的斜率 } K' = \infty \quad (26)$$

$$\text{反射光线方程 } x = x'_0 \quad (27)$$

经过 (1)、(2) 两个步骤, 我们求得反射光线方程, 将反射光线当作新的入射光线再进行判断, 直到光线到达吸收面为止, 这时在吸收面上吸收的能量为:

$$I = I_0 \rho_m^{\bar{n}} \tau_g \cdot \tau_v \cdot \alpha_p \quad (28)$$

式中: \bar{n} —— 入射光线经过反射面反射的次数

ρ_m —— 反射面的反射率

τ_v —— V形透明隔热膜的透过率

τ_g , α_p 分别为玻璃盖板的透过率和吸收面的吸收率, 其求法与前面相同, 只是注意在 $\theta_1 = 0$ 时, $\beta_1 \neq 0$ 。

II、集热器传热数学模型

太阳能集热器做为一种换热器, 不仅把太阳能转换成有用的热量, 其本身也会向周围环境散失热量, 因此其间的传热是一个复杂的过程, 既存在着太阳与集热器的辐射换热, 又存在着集热器与周围环境的对流与辐射换热。特别是吸热面, V形隔热膜, 玻璃盖板以及反射面之间的换热是非常复杂的。为了使分析简化, 必须做一些假定:

1) 不论是直射辐射, 还是漫射辐射, 到达玻璃盖板, V形隔热膜和吸收面上都呈漫射状态, 这样在集热器内的吸收和发射都表现为漫射性质。

2) 热分析分成两个波段进行, 即太阳能光波段和红外线波段。

3) 不考虑玻璃盖板, 吸收面的温度分布, 而用各自的平均温度。

4) 假设在V形膜上, 从A点到B点或C点(见图6)的温度变化是线性的。

图 6



5) 由于V形槽所隔离的空气空间很小, 因此可以认为气体不发生自然对流, 而只有导热损失。

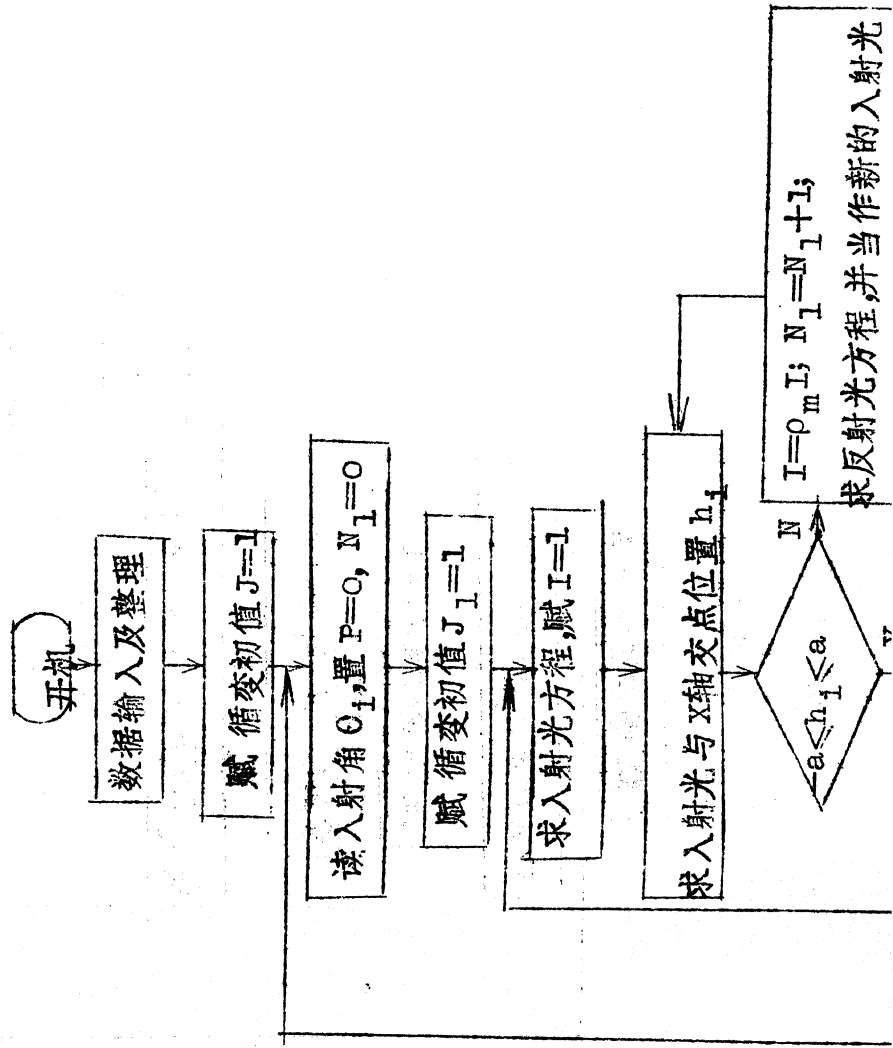
6) 由于V形膜对红外辐射有一定的透过能力(对于聚碳酸酯薄膜, 在板温 $T_p=70\sim 110^\circ\text{C}$ 之间, 膜的透过率 $\tau'_v \approx 0.1$ [29])。因此, 要考虑吸热面透过V形膜与玻璃盖板间的辐射的辐射换热。

有了以上的假设, 我们就可以建立集热器内传热过程的数学模型。图7是其传热网络图。

1、换热量计算方程

入射在集热器采光面上的太阳光经反射面反射后到达玻璃盖板, V形透明隔热膜和吸收表面而被吸收, 这是一个在太阳光波长范围内的传热过程。

(1) 直射光部分



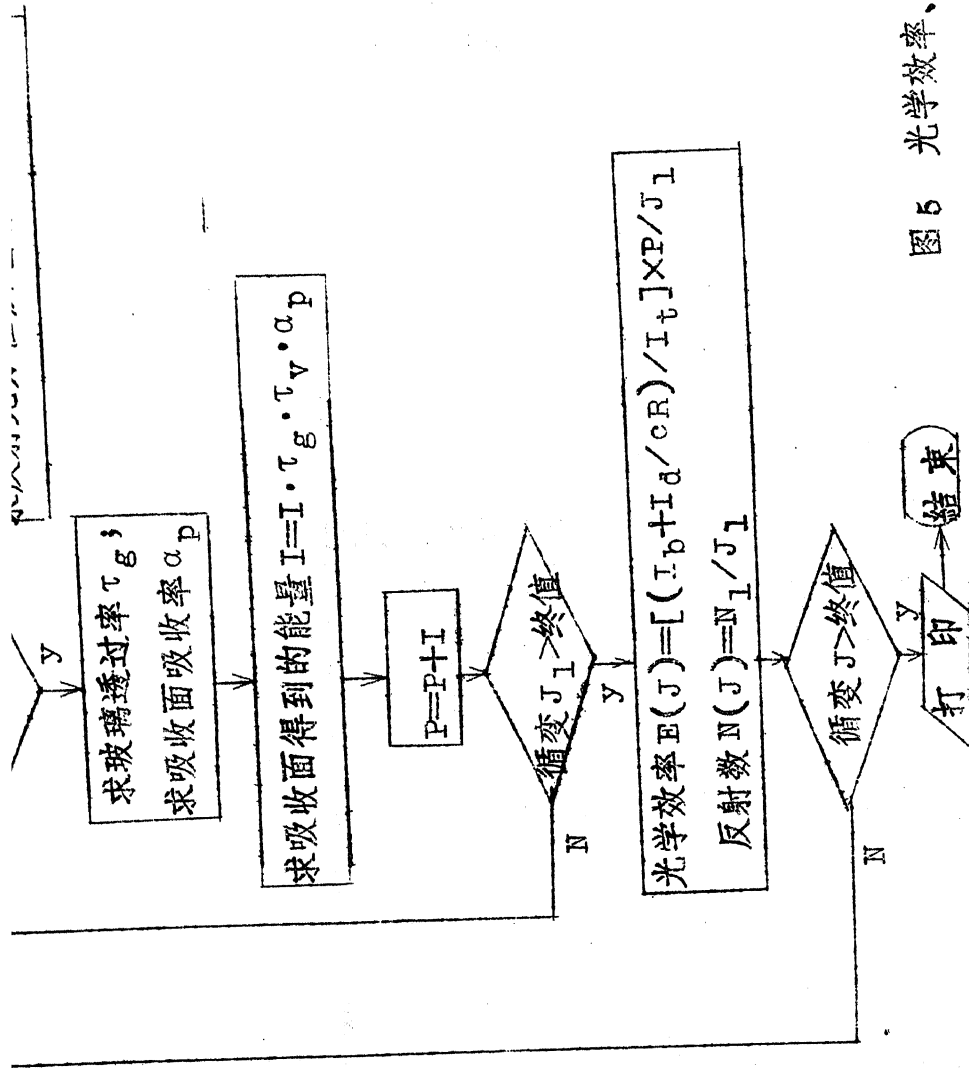


图 5 光学效率、反射次数计算流程图

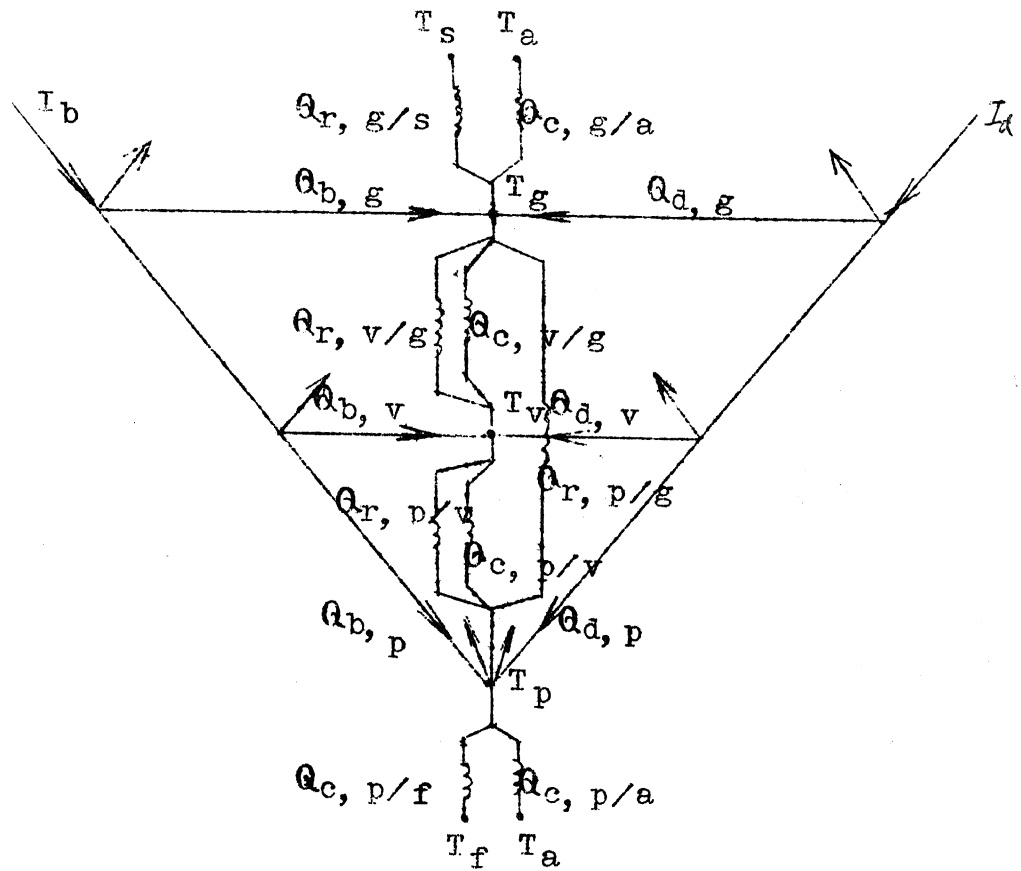


图7 FPV-CPC 集热器传热网络图

1) 直射光经聚焦后射在玻璃盖板上，并被吸收的能量为：

$$Q_{b, g} = I_b (1) \rho_m \bar{n} [\alpha_g(j) + \tau_g(j) \bar{\rho}_v \bar{\alpha}_g A_g / A_v + \bar{\alpha}_g \bar{\rho}_p \bar{\tau}_g(j) \tau_v(j) \bar{\tau}_v] A_a \quad (29)$$

式中 $A_a = 2a_T L$ ，是光孔的面积。中括号中的第二项表示 V 形膜反射出的直射光被玻璃盖板所吸收的能量，第三项表示吸收面反射出

的直射光被玻璃盖板所吸收的能量。

ii) 直射光射在V形膜上并被吸收的能量为:

$$Q_{b, v} = I_b(i) \rho_m \bar{n} \tau_g(j) [\alpha_v(j) + \tau_v(j) \bar{\rho}_p \bar{\alpha}_v + \bar{\rho}_v (1 - A_g/A_v) \cdot \bar{\alpha}_v + \bar{\rho}_v \bar{\rho}_g \bar{\alpha}_v A_g/A_v] A_a \quad (30)$$

中括号中的第二项表示吸收面反射出的直射光被V形膜所吸收的能量, 第三项表示由V形膜反射出后又被盖板反射回来而被V形膜所吸收的能量。

iii) 直射光射在吸收面上并被吸收的能量为:

$$Q_{b, p} = I_b(i) \rho_m \bar{n} \tau_g(j) \tau_v(j) [\alpha_p(j) + \bar{\rho}_p \bar{\rho}_v \bar{\alpha}_p A_p/A_v + \bar{\rho}_p \bar{\tau}_v^2 \bar{\rho}_g \bar{\alpha}_p] A_a \quad (31)$$

中括号中的第二项表示由吸收面反射出后又被V形膜反射回来而吸收的能量, 第三项表示由吸收面反射出后又被玻璃盖板反射回来而吸收的能量。

(2) 漫射部分

i) 漫射到盖板上并被吸收的能量为:

$$Q_{d, g} = I_d \rho_m \bar{n} \bar{\alpha}_g [1 + \bar{\rho}_v \bar{\tau}_g A_g/A_v + \bar{\rho}_p \bar{\tau}_g \bar{\tau}_v^2] A_g \quad (32)$$

式中 A_g 为盖板的面积。

ii) 漫射到V形膜上并被吸收的能量为:

$$Q_{d, v} = I_d \rho_m \bar{n} \bar{\alpha}_r \bar{\tau}_g [1 + \bar{\tau}_v \bar{\rho}_p + \bar{\rho}_v (1 - A_g/A_v) + \bar{\rho}_v \bar{\rho}_g A_g/A_v] A_g \quad (33)$$

iii) 漫射到吸收面上并被吸收的能量为:

$$Q_{d, p} = I_d \rho_m \bar{n} \bar{\tau}_g \bar{\tau}_v \bar{\alpha}_p [1 + \bar{\rho}_p \bar{\rho}_v A_p/A_v + \bar{\rho}_p \bar{\rho}_g \bar{\tau}_v^2] A_p \quad (34)$$

式中 A_p 为吸收面的面积

集热器受到太阳能的照射后，本身的温度会提高，从而引起辐射这是一个在红外线波长范围内的热交换过程。

a) 玻璃盖板与天空间辐射换热量

$$Q_{r, g/s} = \epsilon_{\text{eff}} \sigma (T_g^4 - T_s^4) A_g \quad (35)$$

由于反射面的作用，所以用有效辐射率来代替玻璃的辐射率，有效辐射率的计算可参阅文献 [8]，结果是：

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{eff}gs} + \frac{\epsilon_{\text{eff}gm} \cdot \epsilon_{\text{eff}ms}}{\epsilon_{\text{eff}gm} + \epsilon_{\text{eff}ms}} \quad (36)$$

而 $\epsilon_{\text{eff}gs} = \rho_{mi} \epsilon_{gi}$; $\epsilon_{\text{eff}gm} = \epsilon_{mi} \cdot \epsilon_g$;

$$\epsilon_{\text{eff}ms} = (1 + \rho_{mi} \rho_g) \epsilon_{mi} + \left(\frac{A_a - A_g}{A_g} \right) \epsilon_{m_0}$$

下标 g, s, m 分别代表玻璃盖板，天空和反射面， A_a 为光孔的面积。

b) 盖板与周围环境的对流换热量

$$Q_{c, g/a} = A_g h_{c, g/a} (T_g - T_a) \quad (37)$$

$$\text{式中 } h_{c, g/a} = 5.7 + 3.8 v_w \quad (38)$$

c) V形隔热膜与玻璃盖板间的辐射换热量(详细推导见附录D)

$$Q_{r, v/g} = A_g h_{r, v/g} (T_v - T_g) \quad (39)$$

$$\text{式中 } h_{r, v/g} = \frac{\sigma T_v^4 - J_g}{A_g R_4 (T_v - T_g)} \quad (40)$$

J_g —玻璃盖板的有效辐射量

$$R_4 = 1/A_g \epsilon_v$$

d) V形隔热膜与玻璃盖板间的对流换热量

$$Q_{c, v/g} = A_g h_{c, v/g} (T_v - T_g) \quad (41)$$

由假定 4)、5) 可得出:

$$h_{c, v/g} = 2K_a/H \quad (42)$$

K_a —空气的导热系数。

H —V形槽的高度。

e) 吸热面与V形膜间的辐射换热量(详细推导见附录D)

$$Q_{r, p/v} = A_p h_{r, p/v} (T_p - T_v) \quad (43)$$

$$\text{式中 } h_{r, p/v} = \frac{J_p - \sigma T_v^4}{A_p R_3 (T_p - T_v)} \quad (44)$$

J_p —吸热面的有效辐射量

$$R_3 = 1/A_p \epsilon_v$$

f) 吸收面与玻璃盖板间的辐射换热量(详细推导见附录D)

$$Q_{r, p/g} = A_p h_{r, p/g} (T_p - T_g) \quad (45)$$

$$\text{式中 } h_{r, p/g} = \frac{J_p - J_g}{A_p R_2 (T_p - T_g)} \quad (46)$$

$$R_2 = 1/A_p \tau'_v$$

g) 吸收面与V形膜间的对流换热量

$$Q_{c, p/v} = A_p h_{c, p/v} (T_p - T_v) \quad (47)$$

式中 $h_{c, p/v} = N_{up/v} \cdot K_a / L$ (48)

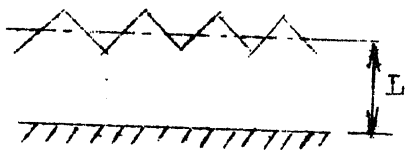


图 8

L——定性尺寸，如图 8 所示

$N_{up/v}$ ——吸收面与V形膜间自然对流努赛尔数，采用 Hollands [26] 推导的公式，即：

$$N_{up/v} = N_{uc} + K \left[1 - \frac{Ra_c}{Ra_c \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{Ra_c (\sin 1.8 \theta)^{1.6}}{Ra_c \cos \theta} \right] + B \left[\left(\frac{Ra_c \cos \theta}{3377} \right)^{1/3} - F \right] \quad (49)$$

$\theta \leq 60$ 度

$$N_{uc} = A \ln \left(\frac{2A+1}{2A-1} \right) \sqrt{(1 - 0.13/A - 0.067/A^2)}, \quad A = L/H \quad (50)$$

$$Ra_c = 1708 + \frac{945}{(A - 0.5)} \cdot 0.923 \quad (51)$$

$$K=1.44\left[1-\frac{1.15}{A}+\frac{6.74}{A^2}-\frac{5.28}{A^3}\right] \quad (52)$$

$$B=\frac{1.33}{\cos(\theta-23.5)} \quad (53)$$

$$F=1.515-3.417\times 10^{-2}\theta+1.289\times 10^{-3}\theta^2-1.158\times 10^{-5}\theta^3, \\ (\theta \text{ 为度}) \quad (54)$$

h) 由吸热管传给液体的能量

$$Q_o=A_{t, o}U_{t/f}(T_p-T_{f, m}) \quad (55)$$

$$\text{式中 } U_{t/f}=\left[\frac{D_{t, o}\ln(D_{t, o}/D_{t, i})}{K_t}+\frac{D_{t, o}}{D_{t, i}h_{c, t/f}}\right]^{-1} \quad (56)$$

$D_{t, i}$ ——吸热管内直径

$D_{t, o}$ ——吸热管外直径

$A_{t, o}$ ——吸热管总的外表面面积

K_t ——吸热管导热系数

$$h_{c, t/f}=N_{ut/f}\cdot K_w/D_{t, i} \quad (57)$$

$$\text{而当 } Re\leq 2300 \text{ 时, } N_{ut/f}=4.364 \quad (58)$$

$$Re>2300 \text{ 时, } N_{ut/f}=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (59)$$

2. 能量平衡方程

有了以上(29)~(59)式后, 我们就可以列出集热器各部件的能

量平衡方程:

玻璃盖板:

$$Q_{b, g} + Q_{d, g} + A_g U_{v/g} (T_v - T_g)$$

$$+ A_p U_{p/g} (T_p - T_g) = A_g U_{g/a} (T_g - T_a) \quad (60)$$

v形隔热膜: $Q_{b, v} + Q_{d, v} + A_p U_{p/v} (T_p - T_v) = A_g U_{v/g} (T_v - T_g)$

$$(61)$$

吸收面:

$$Q_{b, p} + Q_{d, p} = A_p U_{p/v} (T_p - T_v) + A_p (U_b + U_e) (T_p - T_a)$$

$$+ A_p U_{p/g} (T_p - T_g) + A_{t, o} U_{t/f} \left(T_p - \frac{T_{f, o} + T_{f, i}}{2} \right)$$

(62)

流体:

$$A_{t, o} U_{t/f} \left(T_p - \frac{T_{f, o} + T_{f, i}}{2} \right) = \dot{m} C_p (T_{f, o} - T_{f, i}) \quad (63)$$

在(60)~(63)四个方程中, 共有 $T_g, T_v, T_p, T_{f, o}$ 四个未知数, 所以可以求解。

式中: $U_{g/a} = \varepsilon_{\text{eff}} \sigma \frac{T_g^4 - T_a^4}{T_g - T_a} + (5.7 + 3.8V)$

$$(64)$$

$$T_s = T_a - \delta \quad (65)$$

$$U_{v/g} = \frac{\delta T_v^4 - J_g}{A_g R_4 (T_v - T_g)} + \frac{2K_a}{H} \quad (66)$$

$$U_{p/g} = \frac{J_p - J_g}{A_p R_2 (T_p - T_g)} \quad (67)$$

$$U_{p/v} = \frac{J_p - \delta T_v^4}{A_p R_3 (T_p - T_v)} + \frac{N_{up/v} \cdot K_a}{KL} \quad (68)$$

$$U_{t/f} = \left[\frac{D_{t,o} \ln(D_{t,o}/D_{t,i})}{K_t} + \frac{D_{t,o}}{D_{t,i} h_{c,t/f}} \right]^{-1} \quad (69)$$

$$U_b = \frac{K_s}{\delta_b} \quad (70)$$

$$U_e = \frac{A_e}{A_p} \cdot \frac{K_s}{\delta_e} \quad (71)$$

(60)~(63)式经过整理后可得:

$$B_1 T_g + B_2 T_v + B_3 T_p = C_1 \quad (72)$$

$$B_2 T_g + B_4 T_v + B_5 T_p = C_2 \quad (73)$$

$$B_3 T_g + B_5 T_v + B_6 T_p + B_7 T_{f, o} = C_3 \quad (74)$$

$$B_8 T_p + B_9 T_{f, o} = C_4 \quad (75)$$

式中: $B_1 = A_g U_{g/a} + A_g U_{v/g} + A_p U_{p/g}$

$$B_2 = -A_g U_{v/g}$$

$$B_3 = -A_p U_{p/g}$$

$$B_4 = A_g U_{v/g} + A_p U_{p/v}$$

$$B_5 = -A_p U_{p/v}$$

$$B_6 = A_p (U_{p/v} + U_b + U_e + U_{p/g}) + A_{t, o} U_{t/f}$$

$$B_7 = \frac{1}{2} A_{t, o} U_{t/f}$$

$$B_8 = -2A_{t, o} U_{t/f}$$

$$B_9 = 2\dot{m}C_p + A_{t, o} U_{t/f}$$

$$C_1 = A_g U_{g/a} T_a + Q_{b, g} + Q_{b, g} + Q_{d, g}$$

$$C_2 = Q_{b, v} + Q_{d, v}$$

$$C_3 = A_p (U_b + U_e) T_a + \frac{1}{2} A_{t, o} U_{t/f} T_{f, i} + Q_{b, p} + Q_{d, p}$$

$$C_4 = (2\dot{m}C_p - A_{t, o} U_{t/f}) T_{f, o}$$

(72)~(75)式可用松弛迭代法求解, 解题的步骤为:

(1) 假定一组温度 $T_g^{(0)}$, $T_v^{(0)}$, $T_p^{(0)}$, $T_{f, o}^{(0)}$

- (2) 求出各常数 $B_1, \dots, B_9, C_1, \dots, C_4$
- (3) 用松弛迭代法求出一组新的温度值 $T_g^{(1)}, T_v^{(1)}, T_p^{(1)}, T_{f, o}^{(1)}$
- (4) 若所求的温度满足精度要求, 则为所求的温度值, 若不满足精度要求, 则回到第(2)步, \dots , 直到所求的温度满足精度要求。

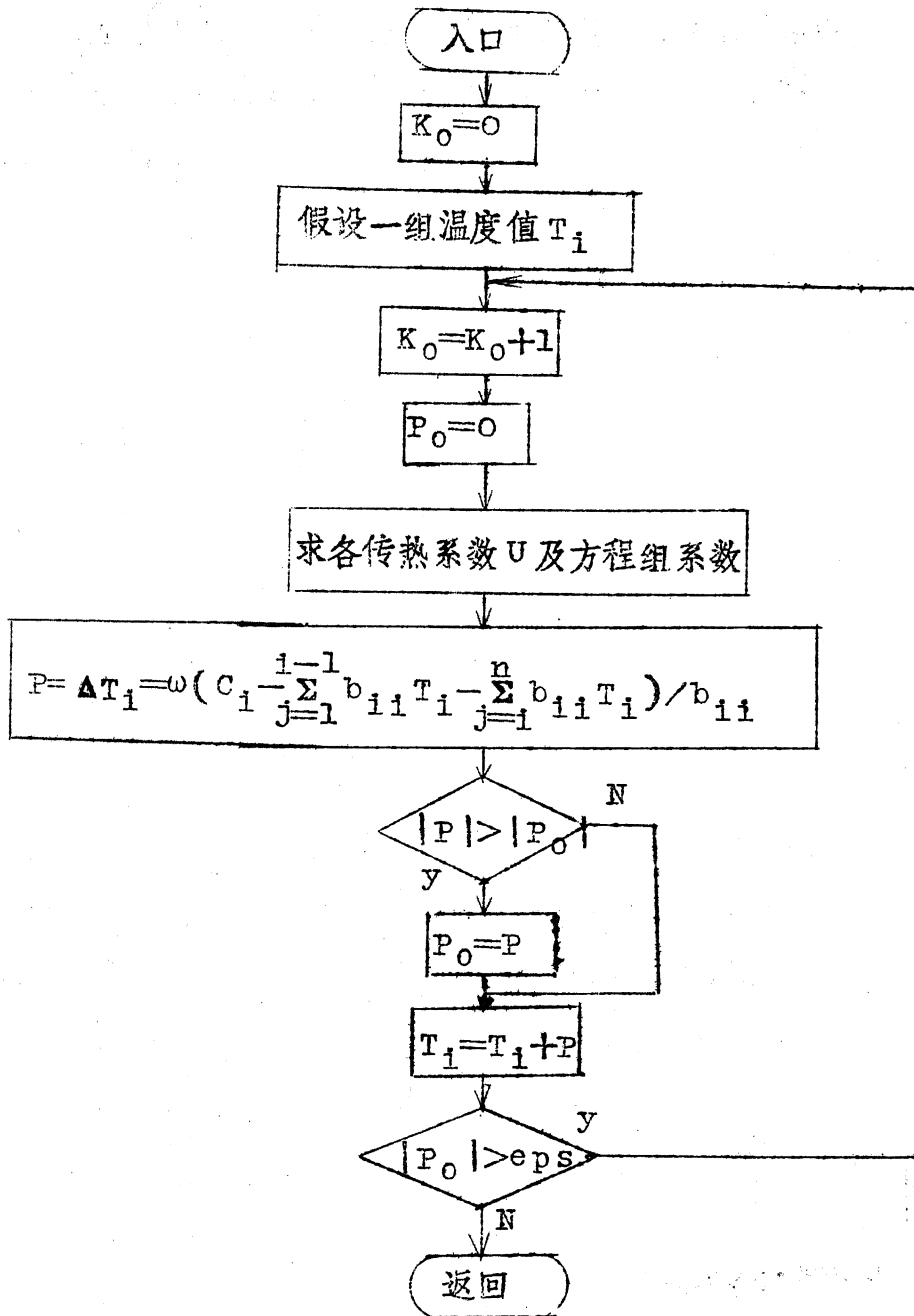


图9 松弛迭代法求解温度流程图

三、集热器性能预测

根据上述所 FPV -CPC 集热器的数学模型, 对本实验装置的性能进行预测, 以研究各参数对集热性能的影响。计算是在 APPLE-Ⅱ 微计算机上进行的, 已知数据列于表 1, 性能预测结果分述如下:

表 1 已知数据

几何参数	$\theta_A=15^\circ$, $\theta_T=35.84^\circ$, $C_R=3$ $A_g=0.66\text{m}^2$, $A_v=1.32\text{m}^2$, $A_p=0.589\text{m}^2$, $A_a=1.767\text{m}^2$ $A_{t, o}=0.1\text{m}^2$, $A_b=0.935\text{m}^2$, $A_e=0.521\text{m}^2$ $D_{t, o}=0.016\text{m}$, $D_{t, i}=0.013\text{m}$, $\delta_b=0.08\text{m}$, $\delta_e=0.06\text{m}$ $H=0.01\text{m}$, $L=0.026\text{m}$
太阳辐射数据	$I_b=783\text{w/m}^2$, $I_d=117\text{w/m}^2$, $I_t=900\text{w/m}^2$, $R=0.91$
环境条件数据	$T_a=20^\circ\text{C}$, $T_i=60^\circ\text{C}$, $v_w=2\text{m/s}$
材料物性	$\alpha_g=0.075$, $\alpha_v=0.02$, $\alpha_p=0.92$; $\tau'_v=0.1$ $\varepsilon_g=0.85$, $\varepsilon_v=0.65$, $\varepsilon_p=0.95$, $\varepsilon_m=0.15$ $\rho_g=0.075$, $\rho_v=0.04$, $\rho_p=0.08$, $\rho_m=0.80$ $\tau_g=0.85$, $\tau_v=0.96$, $n_r=1.449$, $K=0.36(\text{cm}^{-1})$
流体物性	$K_w=0.659\text{w/m}\cdot\text{k}$, $K_a=3.003\times 10^{-2}\text{w/m}\cdot\text{k}$ $K_t=182\text{w/m}\cdot\text{k}$, $K_s=0.037\text{w/m}\cdot\text{k}$ $\mu_w=4.697\times 10^{-4}\text{kg/m}^2$, $\nu_a=1.568\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ $C_p=4186\text{J/kg}\cdot\text{k}$ $Pr_a=0.91$, $Pr_w=0.83$
流体流量	$m=0.019\text{kg/s}$
集热器倾角	$\theta=17.5^\circ$

1. 光学效率

利用前面建立的数学模型, 我们将集热器光孔分成 186 份 (每 0.5 cm 分一份) 输入已知数据, 可求得光学效率及反射次数随入射角的变化, 见图 10、图 11。

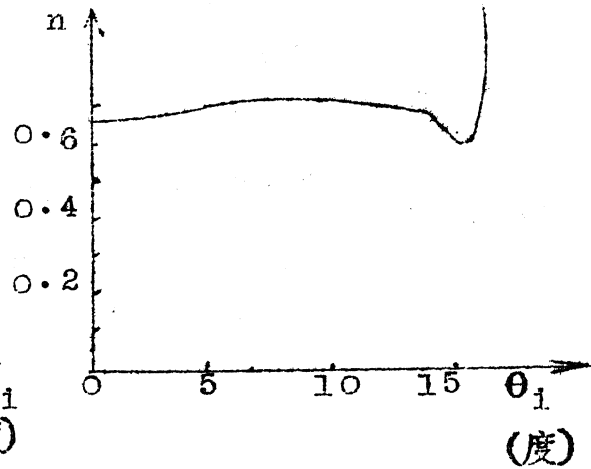
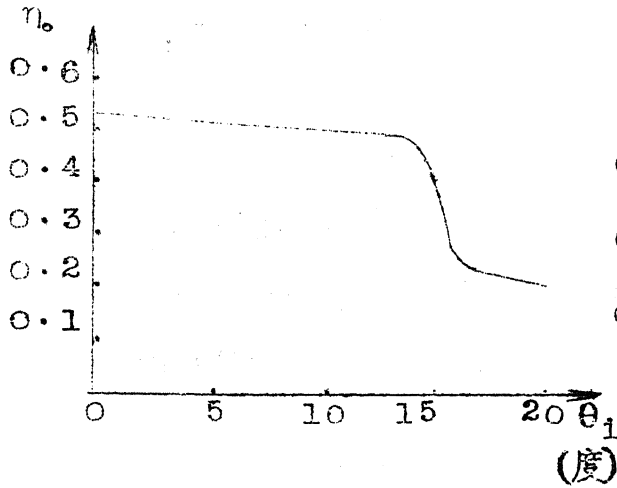


图 10 光学效率随入射角的变化

图 11 反射次数随入射角的变化

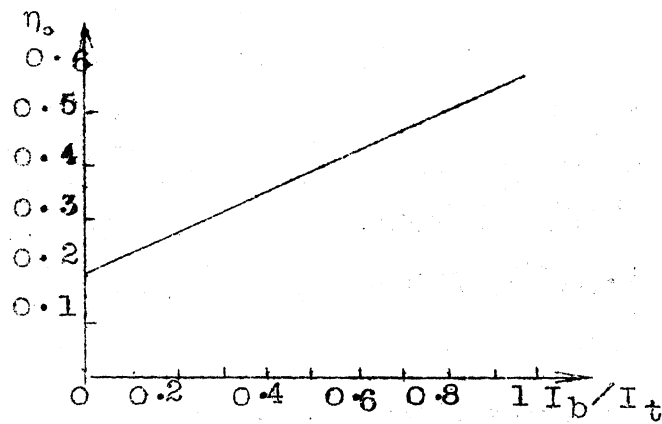


图 12 光学效率随比值 I_b/I_t 的变化

从图 10 中可以看出，在接收角范围内 ($\theta_i < 15^\circ$) 光学效率变化很小；而在接收角范围外 ($\theta_i > 15^\circ$)，光学效率很低，这时集热器接收的主要是散射光和小部分直射光；当入射角 θ_i 在 15° 附近时，光学效率急速下降，这些都是 CPC 集热器所具有的特点，另外我们可以看出这种集热器的光学效率较低，一方面是用反射面的反射率及玻璃的透过率不高所致，另一方面，是由于光线经过聚焦后，到达玻璃盖板时的倾角较大而引起透过损失增大。

图 12 表示光学效率随直射光在总辐射中所占的比率而变化，很明显，光学效率将随着直射光的减少而成直线下降，当直射等于零时，光学效率并不等于零，这时接受的是散射光。

2、在不同的条件下，各部件温度随日照率的变化。

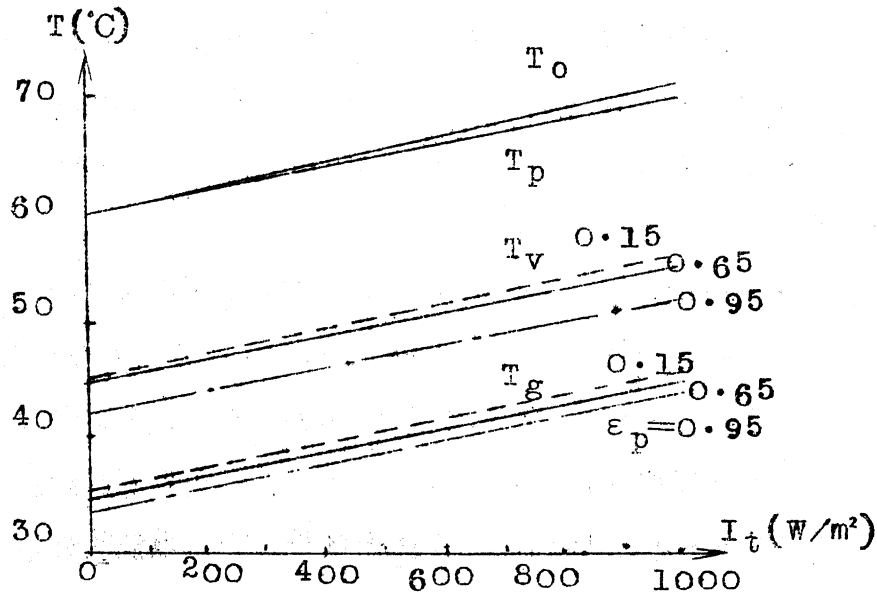


图 13 吸收面发射率对各部件温度的影响

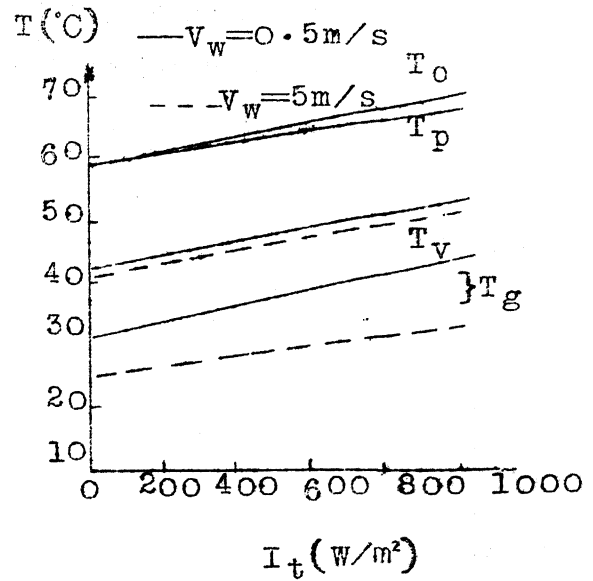
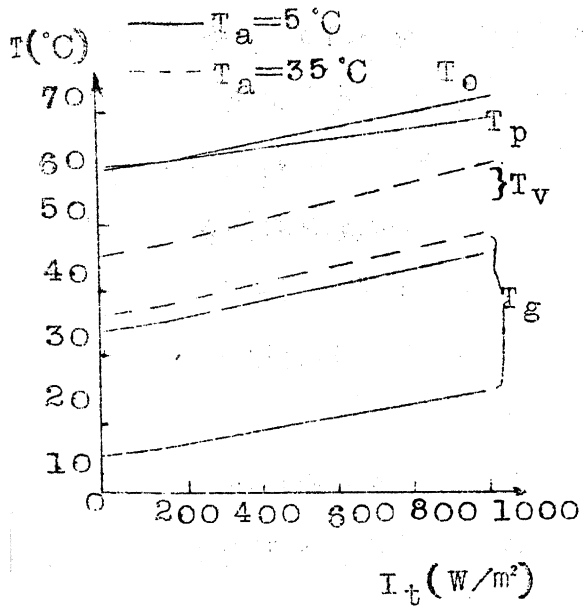


图 14 环境温度对各部件温度的影响

图 15 风速对各部件温度的影响

(1) 发射率的影响: 从图 13 中可以看出, 吸收面的发射率对盖板温度 T_g 和隔热膜温度下影响较大, 这是由于发射率增大时, 辐射损失增大而引起的。但发射率对吸热板温度 T_p 和出口温度 T_o 影响却很小。

(2) 环境条件的的影响: 从图 14 和图 25 中可以看出, 环境温度、风速的变化, 对盖板温度 T_g 影响最大, 对 V 形隔热膜温度 T_v 的影响次之, 而对吸热面和出口温度的影响却很小, 这是由于加上 V 形隔热膜后, 减小了吸热面向外散热而引起的。由此可见这种集热器对外界的适应能力较强, 即使在冬天或大风情况下, 也能较好地运行。

3、热效率

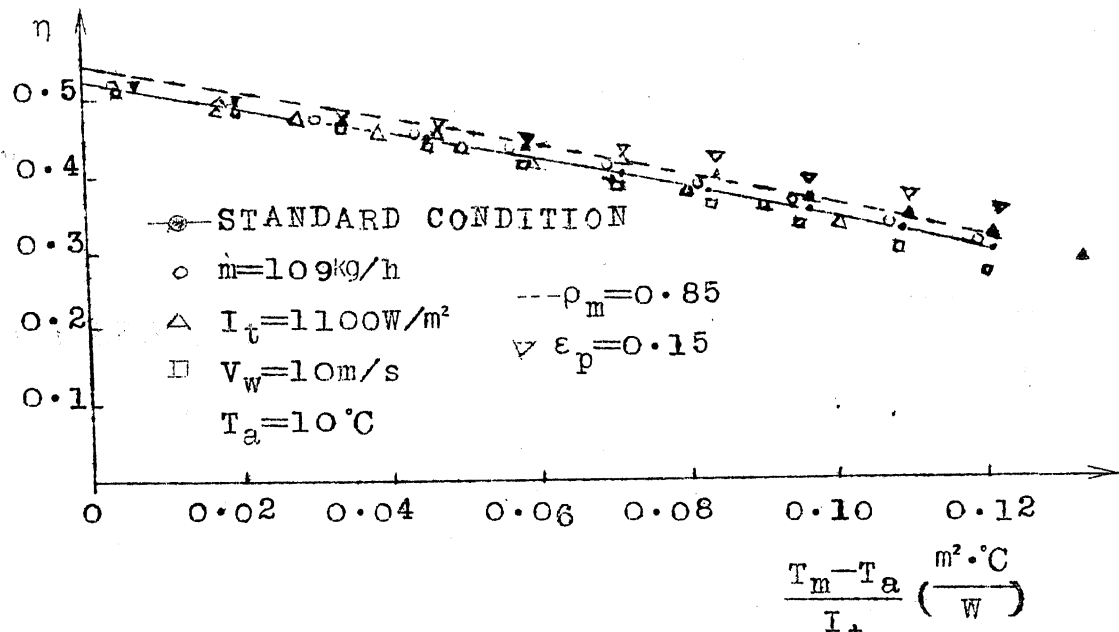


图 16 运行参数及材料特性对热效率的影响

(1) 本文所研究的 FPV-CPC 集热器的效率曲线(见图 16)较平坦,这是由于加上 V 形隔热膜后,减小了对流损失,加上 CPC 反射后,提高了运行温度。计算表示:在 $70^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 的中温范围使用,其效率在 $43.3\% \sim 33.6\%$ 之间。效率曲线的回归方程为:

$$\eta = 0.526 - 1.425 \left(\frac{T_m - T_a}{I_t} \right) - 3.081 \left(\frac{T_m - T_a}{I_t} \right)^2 \quad (76)$$

(2) 流量对热效率的影响:从图 16 中,我们可以看出,工质流量对效率的影响不大,流量增大一倍,效率只增加一点点。这是可以预料的,对于 CPC 集热器,当流量 \dot{m} 足够大时。

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (CR)}{U_L} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{U_L F'}{\dot{m} c_p (CR)} \right] \right\}$$

$$\approx \frac{\dot{m} c_p (CR)}{U_L} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{U_L F'}{\dot{m} c_p (CR)} \right] \right\}$$

$$= F' \quad (77)$$

集热器设计好后， F' 基本上可以当作常数；又由于 U_L 与 \dot{m} 无关，因此从

$$\eta = F_R \left[\eta_c - \frac{U_L}{CR} \left(\frac{T_m - T_a}{I_t} \right) \right] \quad (78)$$

可以看出 η 与 \dot{m} 无关。

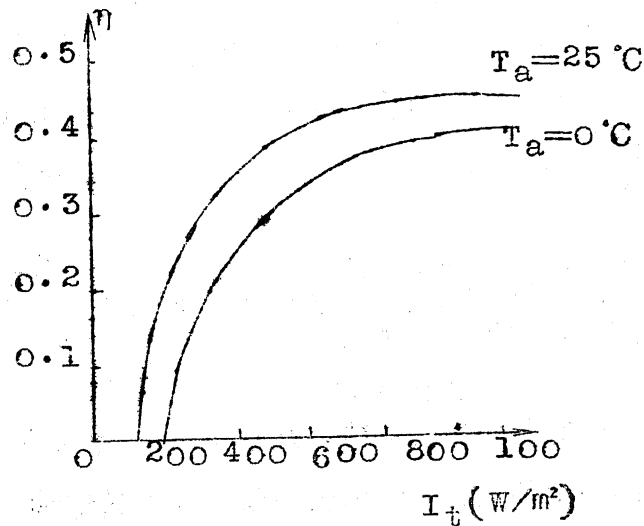


图 17 日照率对热效率的影响

(3) 日照率及环境温度的影响：从图 16 中可以看出日照率增大，在高温处，效率曲线略微变陡，这种现象在其他类型的 CPC 集热器 [12] 及平板集热器 [28] 都出现。这是因为 I_t 大于一定数值后 η 基本上保持恒定（见图 17），而这时横坐标 $\Delta T/I_t$ 却因在高温处 ΔT 增加的速率小于 I_t 增加的速率而减小，从而导致曲线向左边压缩。同样，在 I_t 为定值时， T_a 增大， T_m 也增大，但 T_m 增大的速率比 T_a 慢，所以导致 T_a 增大时，曲线也向左边压缩。这说明在日照率大或气温高的情况下做出的效率曲线差。

(4) 风速的影响：在运行温度较低时，风速对效率影响不大；而随着运行温度的提高，风速对效率的影响越来越明显。这是因为对于非选择性吸收面的集热器来说，热损与盖板温度的关系比较明显，随着风速的增大，盖板温度下降，从而导致损增大。由此可见，减小吸收面的发射率可以减小风速对效率的影响。

(5) 聚光面反射率的影响：随着反射率的增大，热效率 η 将在整个运行段都得到提高，从计算中得知：反射率从 0.80 增大到 0.85，热效率 η （垂直入射时）将从 53.1% 增大到 55.1%。

(6) 吸收面发射率的影响：减小发射率，将使效率曲线变得更平坦。这是因为对于带 V 形隔热膜的 CPC 集热器，在板温较高时，辐射损失占主要部分，这一点在性能预测 5 中将会更明显地看出，因此，降低发射率，将使热损减小，从而提高效率。

4、热损失系

(1) 吸收面发射率对热损失的影响

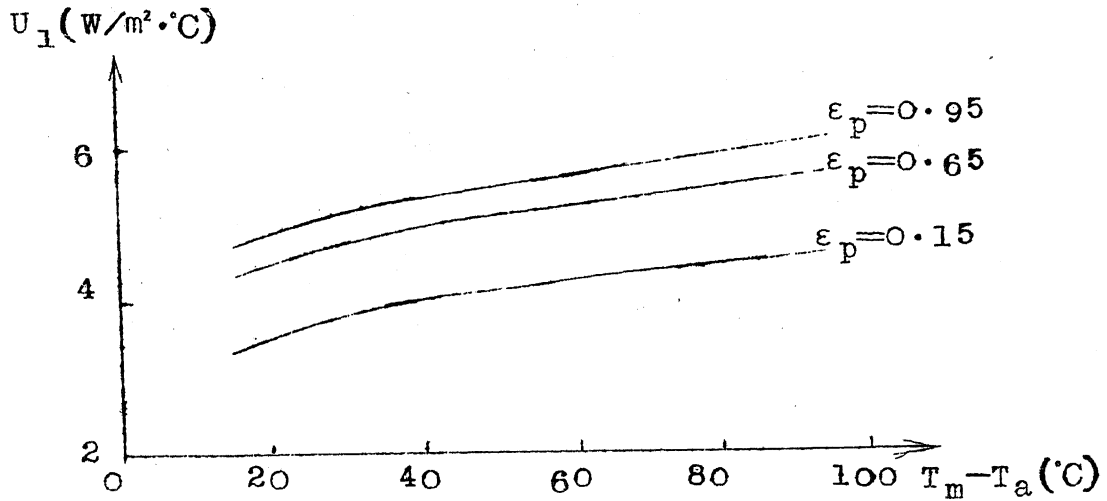


图 18 吸收面发射率对热损失系数曲线的影响

图 18 示出热损失系数随 $T_m - T_a$ 的变化关系，从图上可以看出，带 V 形透明隔热膜的平板集热器的热损系数比一般平板集热器的热损系数要小，特别是带选择性表面，效果更为明显，如果考虑加上 CPC 反射面后，与同样采光面的平板集热器相比，热量损失就更小了。热损失系数曲线的回归方程为：

$$\varepsilon_p = 0.15 \quad : \quad U_1 = 2.951 + 0.035(T_m - T_a)$$

$$\varepsilon_p = 0.65 \quad : \quad U_1 = 4.026 + 0.029(T_m - T_a)$$

$$\varepsilon_p = 0.95 \quad : \quad U_1 = 4.456 + 0.027(T_m - T_a)$$

(2) 环境条件对热损失的影响

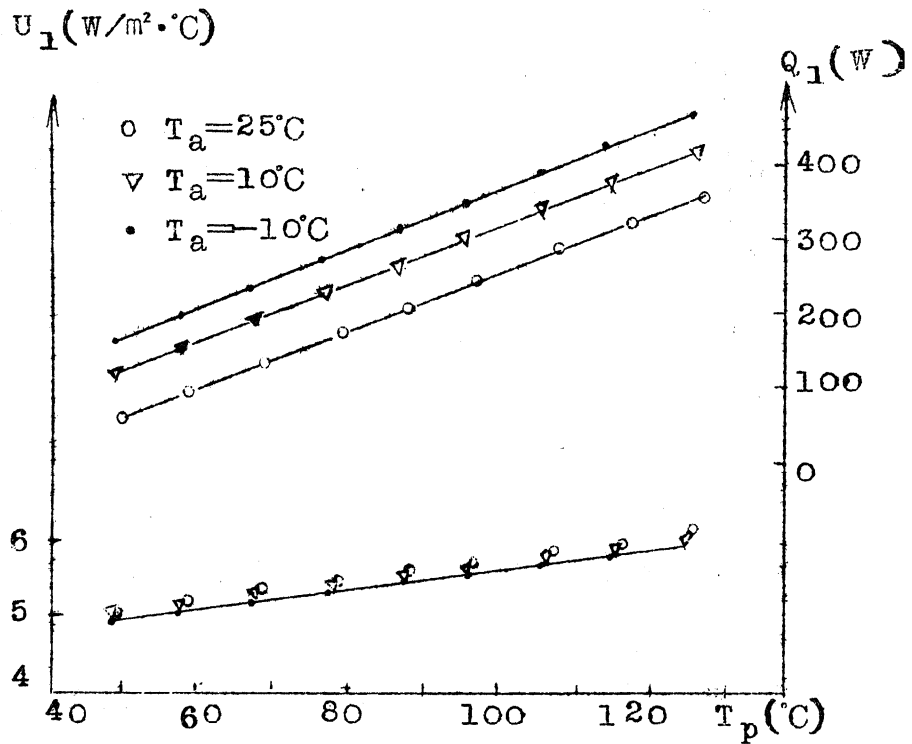


图 19 环境温度对热损失系数曲线的影响

从图 19 中可以看出，环境温度对热损失系数影响不大，当环境温度升高时，热损失系数略微增大，但这并不表明热损失也增大，事实上因为这时 $\Delta T = T_p - T_a$ 将大大减小，而 $Q_1 = A_p U_1 \Delta T$ ，所以 Q_1 是减小的，从同一张图上我们可以明显地看出这一点。

在图 20 中，可以看出风速对热损失系数的影响比环境温度的影响大，这是因为我们在计算盖板与周围环境对流换热时，用了公式 $h = 5.7 + 3.8v_w$ ，即没考虑环境温度对对流换热系数的影响。

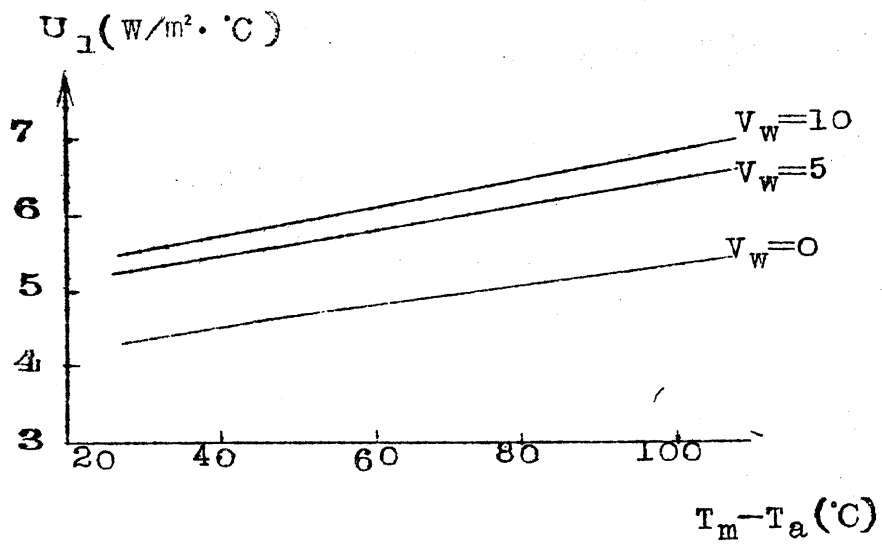


图 20 风速对热损失系数曲线的影响

(3) 吸收面与 V 形膜之间的距离对热损失的影响

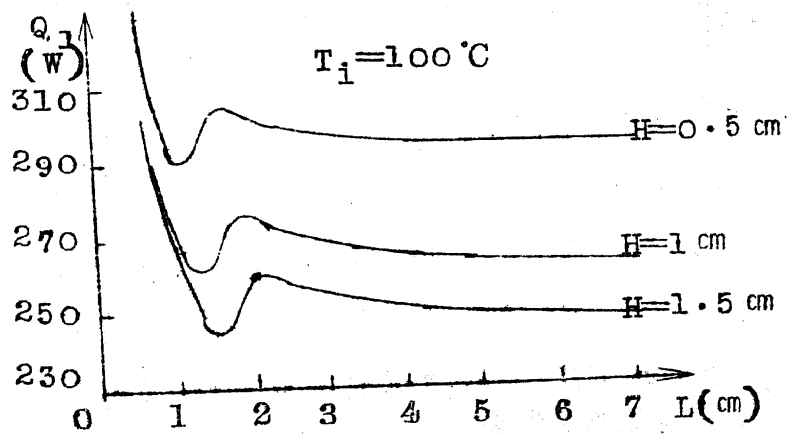


图 21 间距对热损失的影响

从图 21 中可以看出, 对于某一尺寸的 V 形波纹板, 随着波纹板与吸收面距离的增大, 热损失急速下降到一个最低点, 紧接着开始上升, 然后又缓慢下降, 当 L 大到一定数值后 ($L > 4 \text{ cm}$), 热损失基本维持一个较小的数值。这种现象同一般的平板集热器类似 [27]。为了使集热器在整个运行温度范围内都保持较低的热损, L 值应大于第二个临界点 ($L > 4 \text{ cm}$)。另外, 从图 21 中可以看到与一般平板集热器不同的是波纹尺寸对热损失也有影响。在 V 槽内空气不产生对流的条件下, 增大波纹尺寸, 将会减小热损失, 同时最佳间距也略微增大。

5. 热损失分析

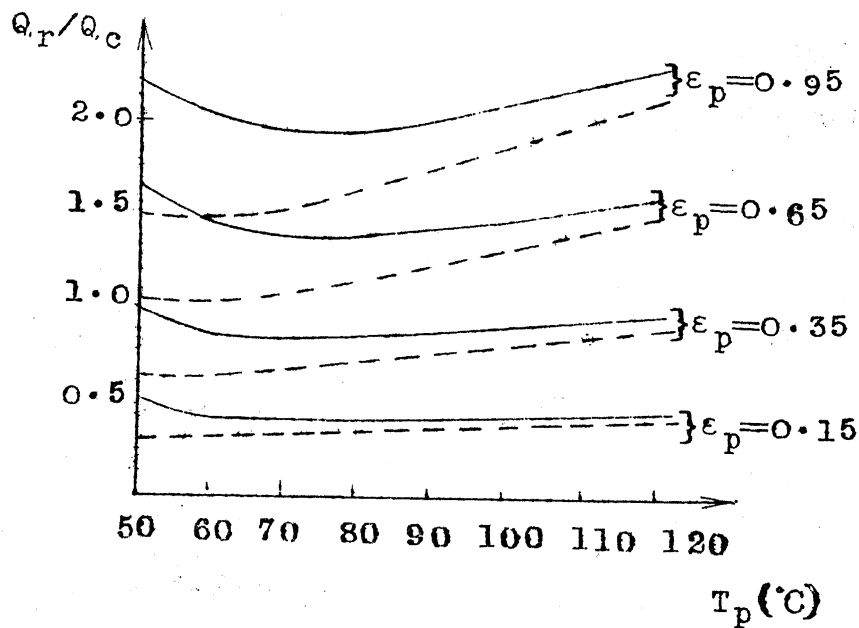


图 22 吸热板温及发射率对比值 Q_r/Q_c 的影响

图 22 示出在不同的发射率, 环境温度下, 辐射损失与对流损失之

比 Q_r/Q_c 随着吸热板温的不同而变化的关系。从图中可以看出，随着板温增大， Q_r/Q_c 开始下降，这似乎不好理解，事实上这是由于在这一段低温范围，对流损失增大的速度比辐射损失增大的速度大的缘故。紧接着 Q_r/Q_c 开始上升，这说明辐射损失增大得比较快。以上这种现象对非选择性表面尤为明显。

从图中可以看出的第二点是，随着吸热面发射率的增大，曲线开始向上移动，即辐射损失所占的比例将越来越大。因此，对于吸热面发射率 $\epsilon_p > 0.35$ 的集热器，减小热损的有效途径不在于减小对流损失，而在于如何减小辐射损失。

另外，我们可以看到，环境温度下降时，曲线向下移动。这说明环境温度下降时，对流损失增大得比较厉害。

6、有效得热

(1) 吸热板温对有效得热的影响

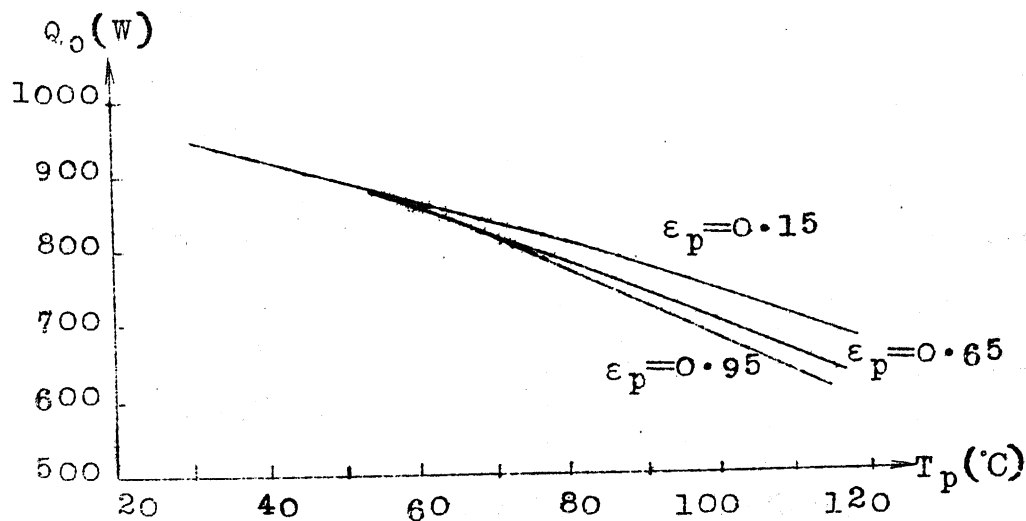


图 23 吸热板温对有效得热的影响

从图 23 中可以看出，随着吸热板温的升高，有效得热将减少，在低温范围，吸热板的发射率对有效得热没什么影响，而随着板温增高，发射率的影响越来越明显。这是因为在低温时，辐射损失不是主要因素，而随着温度的升高，辐射损失的比重越来越大。

(2) 环境条件对有效得热的影响

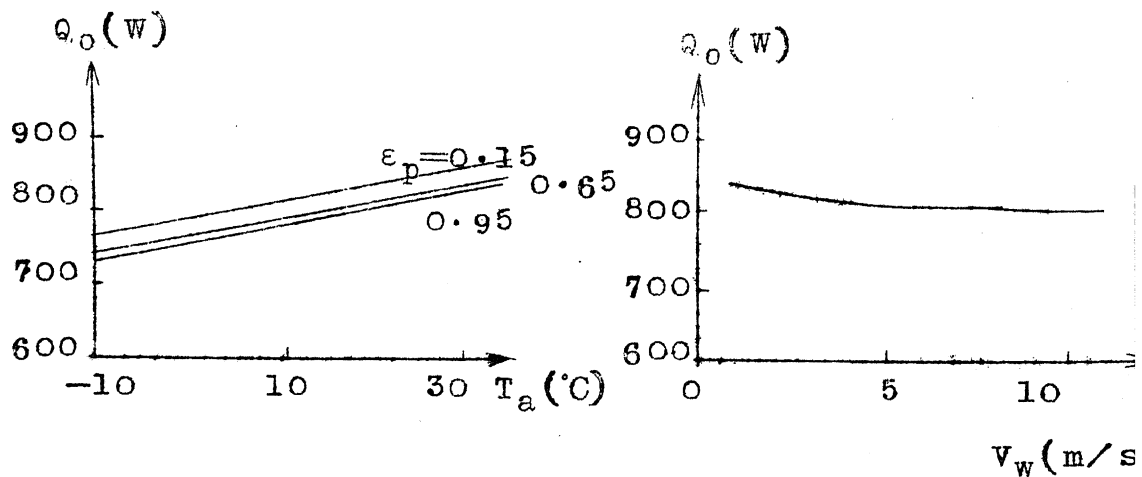


图 24 环境温度对有效得热的影响 图 25 风速对有效得热的影响

图 24 和图 25 分别表示环境温度和风速对有效得热的影响。从图中可以看出有效得热对环境条件变化的灵敏度比较低，这当然是由于我们加上 v 形膜后的结果。由此再一次证明这种集热器对外界环境的适应能力比一般的平板集热器要强。

四、实验装置的描述

(一) 集热器构造

本实验所设计的是一个单体式结构，即整个集热器由单个复合抛物面槽形聚光器及一个带V形隔热膜的平板集热器配以可以进行倾角调整的支架装置配组成的（见图26）。现分述如下：

图 26 FPV-CPC 集热器结构总图

1、接收器

采用带V形透明隔热膜的平板集热器（见图27）。吸收面由四根

带翅片的铝管组成，传热介质在管内通过。翅片管外径为 $\varnothing 16$ ，长度 1.9 m ，翅片宽 77.5 mm 。吸收面外表面涂黑（ $\alpha = 0.92$ ， $\varepsilon = 0.95$ ），管与管之间采用橡胶管连接，接收器周围及背面用矿渣棉隔热，前面用玻璃盖板和V形透明隔热膜进行隔热，V形底宽 10 mm ，高 10 mm ，吸收面与玻璃盖板的距离是 31 mm 。

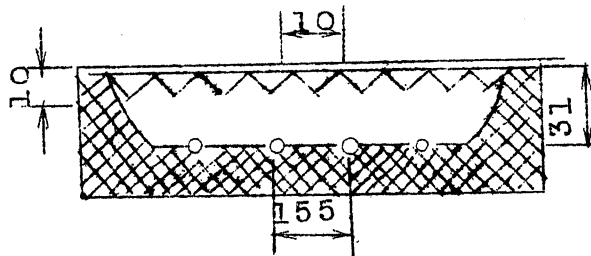


图 27 接收器简图

2、反射器

采用与接收器吸热面相匹配的复合抛物面线型，其横截面如图 28 所示。图中 OO' 为聚光器的光轴， AF_1 ， BF_2 为参数相同的两条抛物线， F_1D ， F_2C 分别为其轴，而 F_1 ， F_2 分别为其焦点。两条抛物线轴夹角 $2\theta_A = 30^\circ$ 。

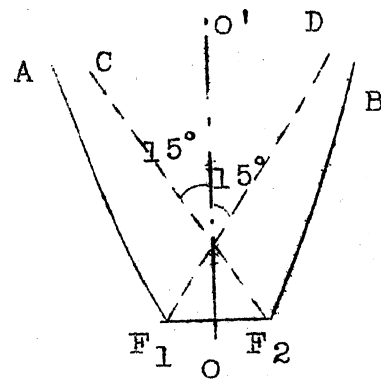


图 28 反射器简图

一个完整的复合抛物面聚光器可以以理想聚焦比接收在接

收角 $2\theta_A$ 范围内从采光口投射进来的全部光线，并置于 F_1 ， F_2 之间的吸收面上。不过在设计时可将反射器高度截短至结构上合理的高度，这可大大减小反射面的面积，又不至于使聚焦比降低很多。聚光器采用角钢做支架、铝板为基材，上面贴以镀铝的聚脂薄膜反光材料，反射率为 0.80。

3、支架

为可以手动调整倾角的钢架。组装后的集热器如图 26 所示。

FPV - CPC 集热器的主要几何参数如下：

采光半角： $\theta_A = 15^\circ$

理论聚光比： $C_{ideal} = 3.86$

实际聚光比： $C_R = 3$

采光面积： $A_a = 1.9 \times 0.93 \text{ m}^2$

吸收面面积： $A_p = 1.9 \times 0.31 \text{ m}^2$

反射器实际高度： $H_T = 0.86 \text{ m}$

吸热管： $\varnothing 16 \times 1900$

翅片： 77.5×1900

V形透明隔热膜：（底宽×高） 10×10

V形透明隔热膜采用聚碳酸脂薄膜。

(二) 实验装置

1、供水系统

实验是在中温集热器测试台上进行的，工质采用压力水，为开路系统。运行系统的加压是通过一台可调流量的计量泵来实现，泵的最大压力可达 25 kg/cm^2 。通过调节该泵的工作参数和系统的阀门，可以控制系统的压力。系统的流程如图 29 所示，作为工质的常温水从补给水箱 1 经计量泵 2 加压后不断输入试验系统。

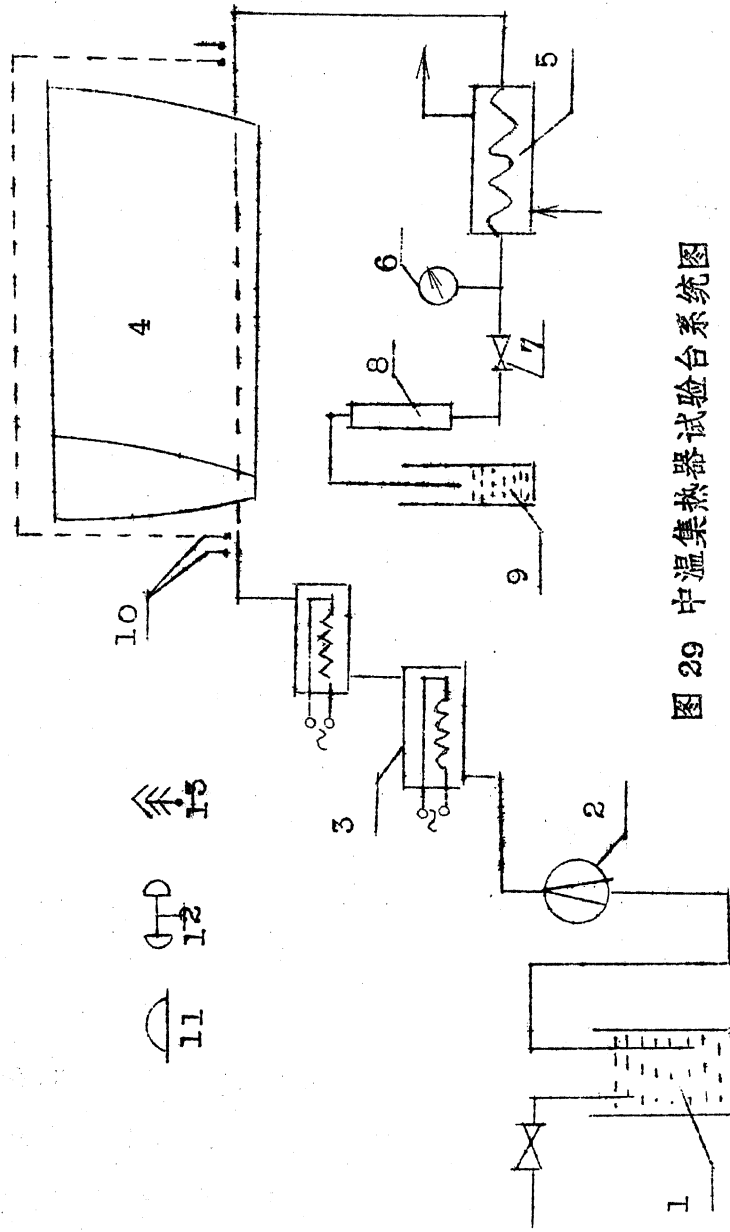


图 29 中温集热器试验台系统图

- 1——补水箱； 2——计量泵； 3——电加热器； 4——FPV-CPG集热器； 5——冷却水； 6——压力计
 7——调节阀； 8——浮子流量计； 9——量筒； 10——热电偶，热电堆； 11——太阳辐射计；
 12——风速仪； 13——环境温度计。

2、电加热器及控温系统

在集热器工质入口处没有两级电加热器了，用调压稳压器来控制电加热器的投入电功率，则可调节集热器入口的工质温度并使之保持稳定。另外，为了便于在常温下测量经集热器的工质流量，在出口处还没有冷却器 5，使工质温度下降至沸点以下。

3、水流量的测量装置

系统的流量由计量泵和闸门调节，用秒表称重法测量流量，转子流量计 6 只是提供指示和流量参考值，不作为试验数据。

4、温度的测量

集热器的进出口水温采用经过校验的铜—康铜热电偶测量，用同类热电偶插入冰水共存的冰壶内作为参考温度，另外还用 6 对铜—康铜热电偶组成热电堆测定集热器的进出口温差，配用 PF-15 型多路直流数字电压表后，测量误差不大于 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。另外，本试验采用铜—康铜热电偶测量环境温度和盖板温度。图 30 为测量仪表，图 31 为数据采集和处理微计算机 APPLE-II。

图 30 实验测量仪表

图 31 APPLE-II 微计算机

5、日照率的测量

本试验采用荷兰 Kipp 公司的天空辐射表来测量总辐射。

辐射表的型号: CC11

灵敏度: $5.45 \times 10^{-6} \text{V/W} \cdot \text{m}^{-2}$

测量范围: $0 \sim 200 \text{W/m}^2$

非线性度: $< 0.2\%$

分辨力: 1W/m^2

本试验还采用 Kipp 公司的散射表来测量漫辐射

型号: CM12

灵敏度: $4.93 \times 10^{-6} \text{V/W} \cdot \text{m}^{-2}$

6、风速的测量

本试验采用日本 EKO 公司的热线风速仪测量风速。

测量范围：0~1 m/s；0~10 m/s；0~50 m/s 三档

精度：± 2%

本项实验基本上参照上海机械学院、北京太阳能研究所编制的《平板太阳能集热器性能试验方法》、美国供暖、制冷、空调工程学会标准《确定太阳能集热器性能试验方法》(The ASHRAE Standard 93-77) 和欧洲共同体提供的《欧洲共同体太阳能集热器联合测试提纲》中所推荐的方法进行的。实验测定了下列五项参数。

- 1、时间常数
- 2、瞬时效率
- 3、热损失系数
- 4、日平均效率
- 5、入射角对效率的影响

五、实验结果

1、时间常数的测定

为了测量集热器的时间常数，我们使进口工作流体温度略高于环境温度，维持集热器处于稳定工作状态。在某一时间 τ_1 ，用泡沫板遮挡阳光，使日照率由 $900\text{W}/\text{m}^2$ 突然阶跃变到零，连续测定并记录集热器出口工作流体温度 $T_{f,0}$ 的变化规律。试验结果见表 2 和图 32。

表 2 时间常数的测定结果

$T_{in}=29,42$							
$\Delta\tau(\text{s})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\tau(\text{s})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\tau(\text{s})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\tau(\text{s})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$
0	40.18	170	33.93	320	32.37	470	31.86
15	39.42	180	33.74	330	32.35	480	31.84
30	38.76	190	33.62	340	32.27	490	31.84
45	38.02	200	33.4	350	32.25	500	31.82
60	37.28	210	33.28	360	32.2	510	31.82
70	36.81	220	33.21	370	32.15	520	31.82
80	36.33	230	33.09	380	32.11	530	31.79
90	35.9	240	33.02	390	32.06	540	31.77
100	35.56	250	32.9	400	32.03	550	31.74
110	35.32	260	32.85	410	31.99	560	31.72
120	34.96	270	32.76	420	31.99	570	31.72
130	34.65	280	32.61	430	31.96	580	31.7
140	34.39	290	32.59	440	31.94	590	31.67
150	34.22	300	32.49	450	31.91	600	31.65
160	34.1	310	32.42	460	31.89		

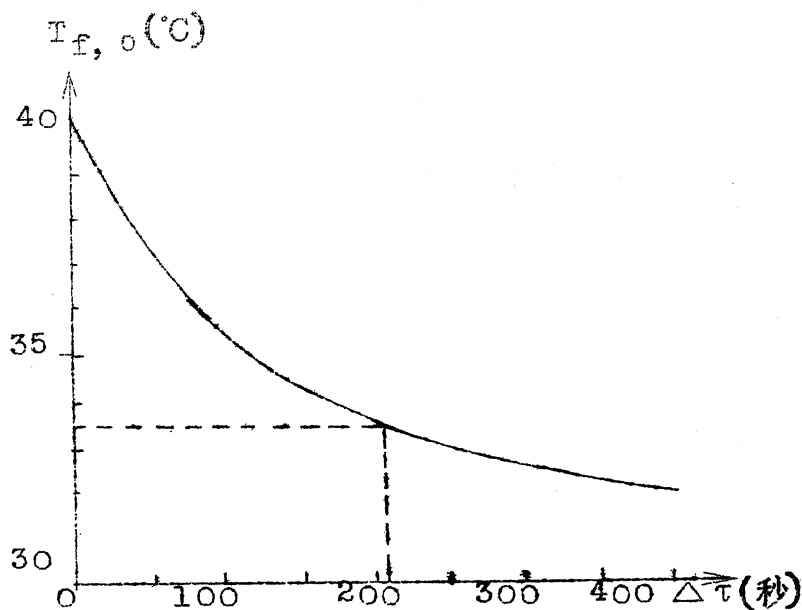


图 32 时间常数测定曲线

根据 $T_f(\tau_2) = 0.368[T_f(\tau_1) - T_1] + T_1$ 求出 $T_f(\tau_2)$ 后，在温降曲线图 32 上找出对于此温度下的时间 τ_2 ，就可以求得时间常数 $\tau_c = \Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 3.35$ 分钟。

由此可知，这种 FPV-CPC 集热器的时间常数较小，集热器对瞬变的辐射，风速等环境因素引起的过渡过程比较短，有利于排除间歇阳光，风速波动等造成的影响。

2. 瞬时效率的测定

1985 年 9 月 9 日至 18 日，在正午前后，我们对不带反射面的平板集热器进行试验。1985 年 10 月 11 日至 21 日，对加上反射面 FPV-CPC 集热器进行了试验。试验时，集热器均为东西向安放，采光平面倾角调至太阳光正午时法向入射，实验条件及测试项目参照

目前国内外介绍的平板集热器性能测试方法进行。试验结果见表 3、表 4 及图 33。用回归分析法可整理成如下表示式：

$$\eta = 0.528 - 0.794 \left(\frac{T_m - T_a}{I_t} \right) - 22.061 \left(\frac{T_m - T_a}{I_t} \right)^2$$

表 3 平板集热器瞬时效率测定结果

Testing Time	T _{in}	T _{out}	T _{amb}	T _{gla}	I _{sl}	F.R.	DT/It	Eff
September 9								
13:00-13:15	42.34	50.9	31.06	36.86	1007	34.2	.015	57.4%
13:18-13:25	42.59	51.68	31.58	36.58	961	34.2	.016	63.9%
September 10								
11:53-12:00	64.42	72.14	31.53	53.09	1101	33.08	.033	45.8%
12:22-12:38	66.27	73.39	31.82	51.98	1059	33.08	.036	43.9%
September								
12:30-12:44	78.96	85.56	32.77	56.34	1134	33.25	.044	38.2%
12:52-13:10	79.41	84.77	32.98	54.26	990	33.25	.05	35.5%
September 15								
11:53-12:00	68.65	74.25	32	54	916	34.38	.043	41.5%
12:05-12:15	68.89	74.66	32.36	54.56	938	34.38	.042	41.8%
September 16								
12:00-12:12	37.5	48.15	32.94	45.11	1038	31.87	.01	64.6%
12:15-12:30	37.22	47.68	34.17	45.59	1007	31.87	8E-03	65.4%
September 17								
12:00-12:10	93.28	98.17	32.42	62.2	1049	33.81	.06	31.1%
12:15-12:25	92.6	97.07	32.92	62.08	988	33.81	.062	30.2%
September 18								
12:45-12:51	82.74	87.24	33.67	54.79	842	34.2	.061	36.1%
12:53-1300	82.01	86.56	33.36	53.48	835	34.2	.061	36.3%

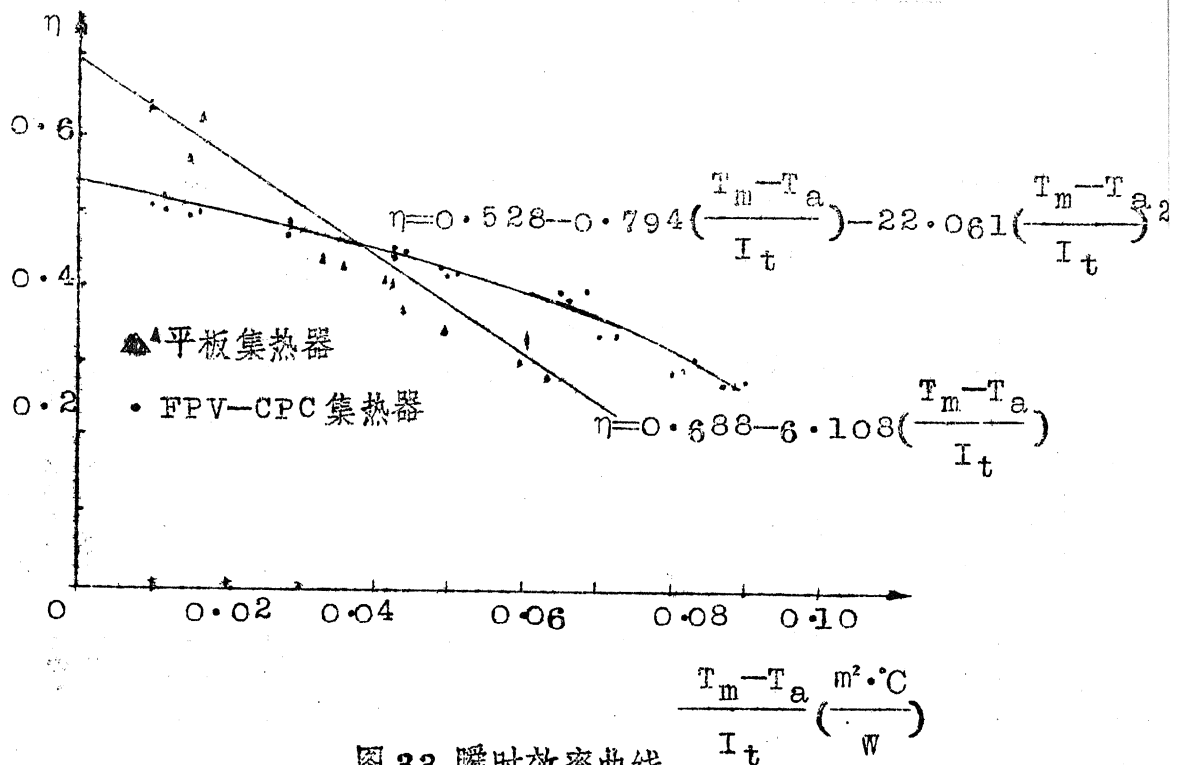


图 33 瞬时效率曲线

从图 33 中可以看出,加上 CPC 反射面后,效率曲线比平板型要平坦得多。这是由于相对于同样采光面积的平板集热器来说,FPV-CPC 集热器的热损比较小。从进口温度 $T_1 = 65^\circ\text{C}$ 开始,FPV-CPC 集热器的热效率就大于平板集热器,而且随着温度的升高,这种差别越来越大。这说明本文所研究的集热器的中温性能比平板集热器好,运行温度在 $70 \sim 110^\circ\text{C}$ 的范围内工作,可以保持比较满意的效率。

3. 热损失系数的测定

1985 年 10 月 15 日至 19 日,我们在夜间测定了 FPV-CPC 集热器的热损系数。为了近似地模拟集热板工作时的温度梯度,将集热器向另一方向转 17.5° ,使工作流体上进下出逆流通过。在测定数

表 4 FPV-CPC 集热

Testing Time	T _{in}	T _{out}	T _{amb}	T _{gla}
October 11				
11:30-11:45	65.01	74.08	29.86	53.81
11:50-12:05	64.77	74.56	29.93	54.2
12:10-12:25	64.4	74.17	30.15	54.45
October 12				
11:45-12:00	72.94	81.13	30.46	56.82
12:05-12:20	72.66	81.09	30.4	58.1
12:25-12:40	72.79	81.5	30.43	58.69
October 13				
11:30-11:45	51.94	61.66	29.92	45.8
11:50-12:05	52.36	62.26	30.44	45.91
12:10-12:25	52.65	62.46	30.4	46.23
October				
11:50-12:05	96.27	103.87	29.97	52.85
12:10-12:25	95.97	103.55	29.94	54.01
12:30-12:45	95.76	103.15	30.25	53.4
October 15				
11:30-11:50	35.9	46.56	30.72	41.66
11:55-12:10	35.91	46.44	30.48	40.87
12:15-12:30	35.89	46.45	30.41	41.34
October 16				
12:15-12:30	40.09	49.34	30.31	43.78
12:35-12:50	40.19	49.37	30.91	44.91
October 19				
11:30-11:45	107.28	113.15	28.58	56.94
11:50-12:05	107.49	113.3	28.92	54.44
12:10-12:25	107.42	113.22	28.49	57.65
October 20				
11:25-11:50	84.98	96.49	26.11	45.58
12:00-12:25	85.16	96.07	26.4	52.25
12:40-13:00	84.24	94.88	28.34	58.52
October 21				
12:00-12:20	102.33	109.04	30.34	53
12:25-12:40	102.52	109.11	30.29	54.48
12:45-13:00	102.82	109.5	30.17	54.97

瞬時效率測定結果

Igl	Idif	F.R.	V _w	DT/It	Eff
921	200	70.32	.63	.043	45.6%
998	223	70.32	.47	.04	45.4%
986	215	70.32	.63	.04	45.9%
911	206	72.09	.99	.051	42.7%
937	208	72.09	1.18	.05	42.7%
958	227	72.09	1.09	.049	43.1%
941	152	70.36	.16	.029	47.8%
934	136	70.36	.17	.029	49.1%
946	195	70.36	.16	.029	48%
991	187	67.89	.53	.071	34.3%
983	192	67.89	.49	.071	34.5%
954	183	67.89	.39	.073	34.6%
922	134	68.1	3	.011	51.8%
915	137	68.1	1.29	.012	51.6%
900	123	68.1	1.29	.012	52.6%
851	129	70.87	.5	.017	50.7%
853	146	70.87	.43	.016	50.2%
924	112	68.18	.46	.088	28.5%
918	113	68.18	.38	.089	28.4%
911	116	68.18	.63	.09	28.6%
991	190	52.5	1.64	.065	40.1%
927	125	52.5	.59	.069	40.7%
922	137	52.5	.47	.066	39.9%
910	166	64.32	.5	.083	31.2%
922	160	64.32	.3	.082	30.3%
943	161	64.32	.34	.081	30%

表 5 热损失系数实验结果

Testing Time	T _{in}	T _{out}	T _{amb}	T _{gla}	F.R.	V _w	T _{m-Ta}	U _l
October 15								
21:00-21:15	99.37	89.68	20.41	44.36	26.43	.54	74.12	6.82
October 16								
19:30-19:40	76.78	70.57	21.21	34.68	24.3	.77	52.47	5.68
20:00-20:10	77.64	71.1	21.08	36.91	24.3	.4	53.29	5.89
20:30-21:40	73.21	71.64	21.03	37.38	24.3	1	53.9	5.85
October 17								
21:00-21:20	87.28	79.35	25.64	39.05	23.7	.23	57.67	6.43
21:30-21:50	87.71	79.59	25.64	38.38	23.7	.39	58.01	6.55
22:00-22:20	87.93	79.96	25.64	38.22	23.7	.61	58.31	6.4
October 18								
20:00-20:20	61.32	57.23	25.78	32.58	21.52	.36	33.5	5.19
20:30-20:50	61.14	57.08	25.74	32.96	21.52	.15	33.37	5.17
21:00-21:20	61.12	57.02	25.58	32.85	21.52	.37	33.49	5.2

据前稳定1个小时以上，每点的测试时间为15分钟，试验结果见表5及图34，用回归分析法可整理成如下表示式：

$$U_1 = 3.74 + 0.041(T_m - T_a)$$

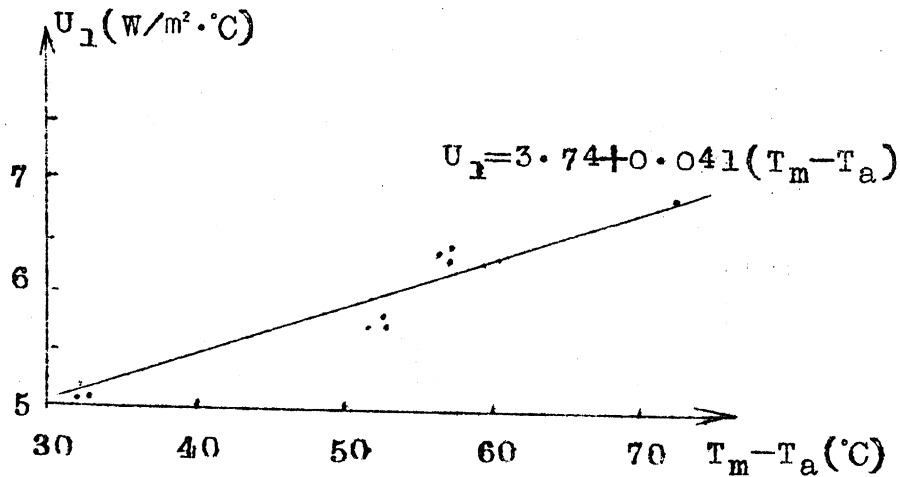


图34 热损失系数曲线

4、日平均效率及入射角对效率的影响

1985年10月20日这一天，天气晴朗，在进口温度 $T_i = 84^\circ C$ ， $T_a = 23.8 \sim 28.8^\circ C$ ， $V_w = 0.53 \sim 1.47 m/s$ 的条件下，从早上9点到下午4点，逐小时测定平均效率。每小时测4次以上，试验结果见表6和图35

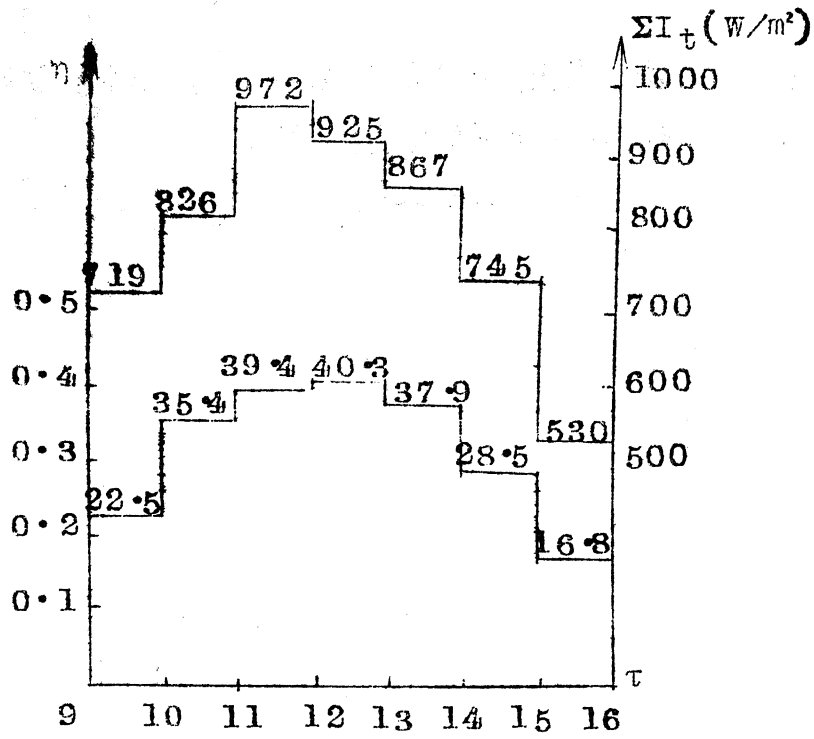


图 35 全日效率

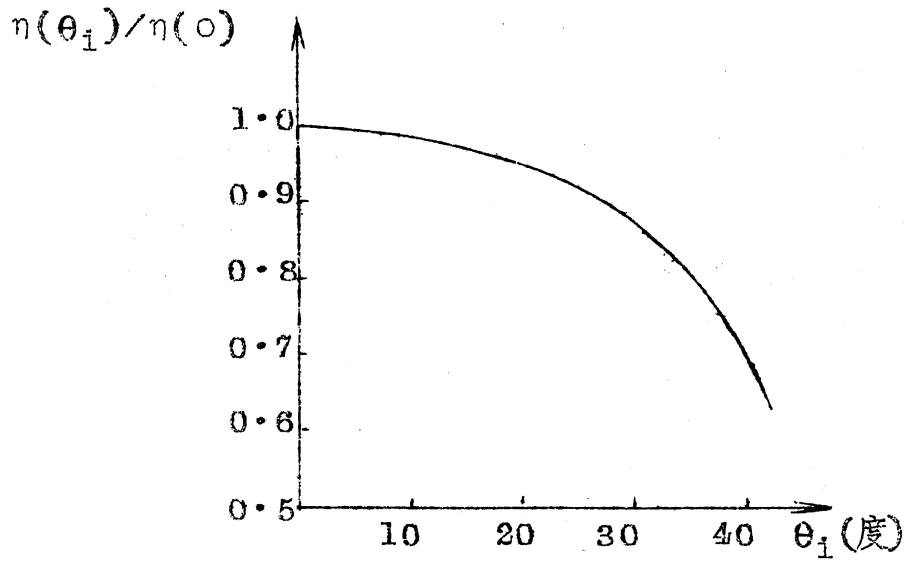


图 36 入射角对效率的影响

表 6 全日效率实验結果

Testing Time	Tin	Tout	Tamb	Tsla	IGI	Idif	F.R.	VW	Eff
09/00-10/00	81.74	86.43	23.8	35.73	719	132	52.5	1.47	22.5%
10/00-11/00	83.26	91.73	25.23	40.86	826	155	52.5	.98	35.4%
11/00-12/00	84.72	95.8	25.82	44.19	972	176	52.5	1.24	39.4%
12/00-13/00	84.7	95.48	27.37	55.38	925	131	52.5	.53	40.3%
13/00-14/00	84.31	93.81	28.25	59.8	867	146	52.5	.64	37.9%
14/00-15/00	84.64	90.86	28.77	61.11	745	137	52.5	.74	28.8%
15/00-16/00	84.84	87.41	28.46	60.17	530	107	52.5	.97	16.8%

这种FPV-CPC集热器从早上9点到下午4点七个小时的平均效率可达31.8%，若从早上9点到下午3点，则可达34.1%。

入射角对集热效率的影响如图36所示，在入射角小于 30° 时，入射角的影响不大，而大于 30° 时，将会使效率急剧下降。这主要是由于加上反射面，在大入射角时，有很大一部分光被聚焦在集热器端头以外（即所谓端头影响）。适当加长集热器的长度可望得到改善，另外在大入射角时，盖板的透过损失也会增大。

六、分析比较

1. 实验热效率与理论热效率的比较

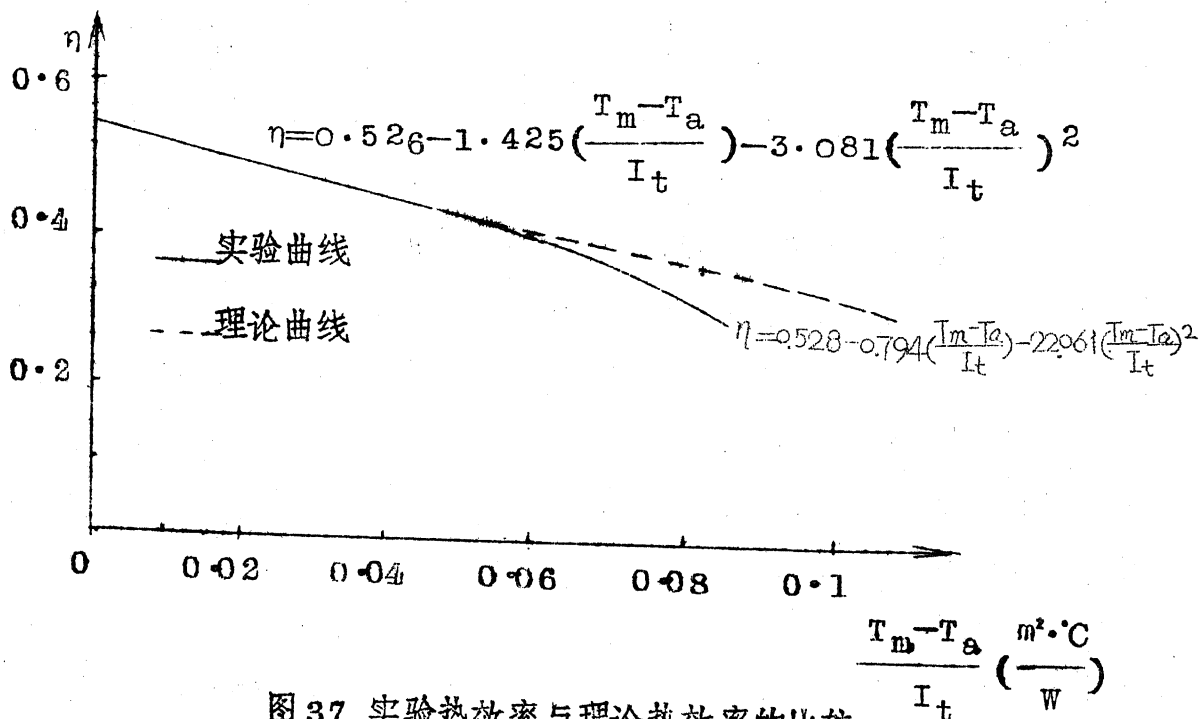


图 37 实验热效率与理论热效率的比较

在图 37 中，我们画出了实验热效率曲线和理论热效率曲线，很明显，在低温时，实验曲线能很好地与理论曲线相吻合，这说明前面建立的理论计算模型的精度比较高；在高温时，实验所测的效率要比理论预测值低，这是因为在高温时，波纹板有一部分软化下垂，造成波纹板与盖板之间的自然对流。另外由于集热器涂层不均匀，保温不良等因素，也使效率有所下降。

2. 实验热损失系数与理论热损失系数的比较

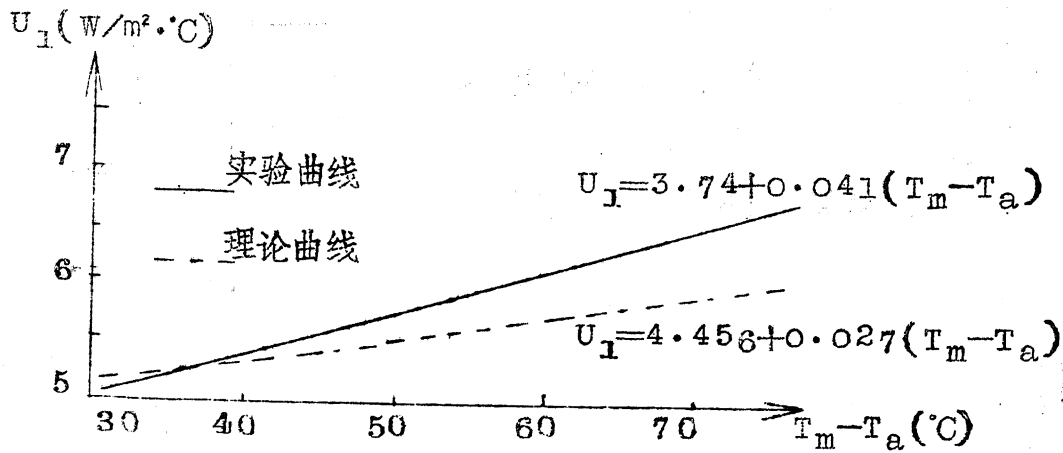


图 38 实验热损系数与理论热损失系数的比较

在图 38 中，我们画出实验热损失系数曲线和理论热损失系数曲线。显然，在低温处，两者相差不大，但在高温处，实验所得的热损失系数比理论预测值要大。正如前面所述，这主要是在高温时，波纹板软化下垂而引起波纹板与盖板之间的自然对流损失。

3、几种中温集热器性能比较

自 CPC 集热器出现以来，国内外不少研究机构都对这种集热器在太阳能中温应用领域进行了研究，特别是在接收器形状结构上作了很多探讨研究。下面我们就选择几种目前国内外研究的 CPC 集热器进行比较，详见表 7 和图 41。

表 7 几种中温集热器性能比较

编号	集热器型式	研制单位	瞬时效率方程
1	TFV-CPC集热器	本文研究	$\eta=0.528-0.794\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)-22.061\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)^2$
2	真空管-CPC集热器	广州能源所	$\eta=0.533-0.385\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)-3.0\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)^2$
3	全玻璃真空管-CPC集热器	重庆大学	$\eta=0.43-1.35\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)$
4	真空盖板-CPC集热器	华中工学院	$\eta=0.56-2.53\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)$
5	肋片管-CPC集热器	美国芝加哥大学	$\eta=0.59-2.7\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)$
6	全玻璃真空管	清华大学	$\eta=0.49-1.99\left(\frac{T_m-T_a}{I_t}\right)$

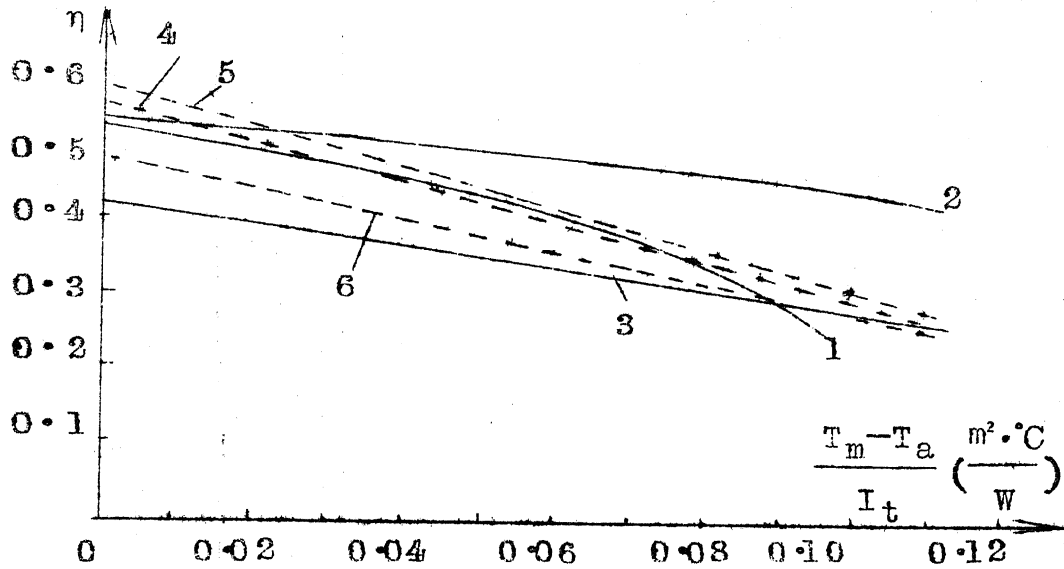


图 39 几种中温集热器性能比较

比较图 39 中各条曲线可以看出：本文所研究的集热器在 $\frac{T_m - T_a}{I_t}$ < 0.08 时，具有较好的性能，只是在 $\frac{T_m - T_a}{I_t} > 0.08$ 时，曲线下

降得稍快，这主要是由于 V 形膜受日晒后软化下垂造成膜与盖板之间自然对流而引起的。因此，只要在结构及装配上进一步改进，就能够使高温段的效率得到提高。另外，本文提出的 FPV-CPC 集热器的光学效率偏低，这是由于反光材料的反射率与透过材料的透过率比较低所致，若能进一步提高材料的性能，则光学效率可以明显地提高。

如果我们从制造工艺和成本方面来比较上述 6 种集热器，很显然，本文所研究的 FPV-CPC 集热器具有制造工艺最简单，成本最便宜的优点。因此，在推广应用方面具有实用性。

由带V形透明隔热膜的平板集热器配以复合抛物面聚光器所组成的太阳能中温集热器，具有结构简单、制作容易的特点。本文对这种集热器进行了比较详细的理论和实验研究，用光线追踪法求解了光学效率，反射次数随光线入射角的变化关系；建立了集热过程的数学模型，通过松弛迭代法求解四个非线性方程的方法对集热器的性能进行了预测；在中温太阳能集热器试验台上测定了这种集热器的主要性能指标，可得如下结论：

1、本文提出的数学模型具有比较高的精度，能够很好地预测集热器的性能，进行集热器设计。实验结果表明，理论计算与实测数据能较好地吻合。

2、采用V形透明隔热膜可以减少能量的损失，利用CPC聚光器可以得到比较平坦的效率曲线。当工质平均温度为 85°C ，环境温度为 25°C ，风速为 1m/s 的情况下，每天工作七个小时，日平均效率可达 31.6% 。因此这种集热器适用于在 $70\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的中温范围，向太阳能空调，太阳能开水器，工艺用热以及冬季气温低的地区取暖提供热源。

3、实验表明：本文所研究的集热器的时间常数较短，对外界环境的适应能力强，有利于排除间歇阳光等造成的影响，在气温较低的冬天或大风情况下，也能较好地运行。

4、本文采用的带V形透明隔热膜平板集热器，在光学方面优于双层盖板的平板集热器，在抑制自然对流方面可以与蜂窝集热器媲美，且由于其加工简单、价格便宜，因此更有利于推广应用。

5、理论计算表明：对于带V形透明隔热膜的平板集热器，最好

采用发射率 $\varepsilon_p \approx 0.4$ 的选择性表面，这样能够更好地体现出隔热层的优越性。对于用更低发射率的选择性表面则没多大必要。

6、理论计算表明：盖板与吸收面的最佳距离为 $L \approx 4 \text{ cm}$ 。

7、本文所提出的 FPV-CPC 集热器的光学效率偏低，这是由于反光材料的反射率和透光材料的透过率比较低所致，若能进一步提高材料的性能，则光学效率可以明显提高。另外，V形膜受日晒后，容易下垂，因此，在结构上要进一步改进，使V形膜与玻璃盖板贴紧。

本文得到吴文研究员、郑振宏工程师的精心指导，谨此致谢！

八、符号说明

一、无需进一步下标说明

a	吸热面宽度的一半	m
a_T	截短后采光面宽度的一半	m
C_p	水的定压比热	$J/kg \cdot K$
C_R	集热器的聚光比	
C_{ideal}	集热器的理想聚光比	
F_R	集热器热转移因子	
F'	集热器效率因子	
f	光线多次反射的修正因子	
H	V形透明隔热膜的高度	m
h_T	截短后, 聚光器的高度	m
I	一条光线所携带的能量	W/m^2
I_0	一条光线入射时所携带的能量	W/m^2
K'	反射光线的斜率	
K_n	反射面的法线斜率	
K	入射光线的斜率	
	玻璃吸收指数	cm^{-1}
L	V形槽中间到吸收面的距离	cm
\dot{m}	流体流量	kg/s
n	光线平均反射次数	
n_r	玻璃折射指数	
R	集热器的接收因子	

R_e	雷诺数	
V_w	风速	m/s
η	热效率	
η_o	光学效率	
θ	集热器倾角	度
θ_A	集热器接收半角	度
θ_i	入射光线的倾角	度
θ_T	集热器截角	度
β_i	入射光线在玻璃上的入射角	度
β_r	光线在玻璃上的折射角	度
σ	玻尔兹曼常数 5.67×10^{-8}	$W/m^2 \cdot K^4$
τ	时间	小时
τ_c	集热器的时间常数	分
δ	玻璃的厚度	cm
μ_w	水的动力粘性系数	
ν_a	空气的运动粘性系数	

二、需进一步下标说明

A	面积	m^2
D	直径	m
I	辐射强度	W/m^2
K	导热系数	$W/m \cdot K$
N_u	努赛尔数	
P_r	普朗特数	
Q	热流量	W

T	温度	K
U	热损失系数	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
α	吸收率	
ϵ	发射率	
ρ	反射率	
τ	透过率	

下标说明

a	空气 环境 集热器采光口
b	集热器背面：直射
c	对流换热
d	漫辐射
e	集热器边缘
eff	有效
f	流体
g	玻璃
i	进口
D	总损失
m	反射面 流体平均量
o	出口
p	吸收面

r	辐射换热
s	天空
	绝缘材料
t	吸热管
	总辐射
v	V形透明隔热膜
w	水

九、参 考 文 献

- [1] 清华大学殷志强, 吴家庆等, 《全玻璃真空管集热器的研制》, 太阳能学报 1981年第 2 卷第 4 期 PP345
- [2] 中科院广州能源研究所, 郑振宏, 黄志成等, 《真空管集热器热损性能的实验研究》, 鉴定材料之三, 1984 年 11 月, 太阳能学报第 6 卷第 4 期。
- [3] R.Winston, Principles Of Solar Concentrators Of a Novel Design, Solar Energy 16 , 89 (1974)
- [4] 中科院电工研究所, 徐任学, 王德录《各种类型复合抛物面聚光器的比较》, 太阳能学报第 3 卷, 第 4 期, 1982 年 10 月。
- [5] 重庆大学, 刘启香, 《尖头园柱复合抛物面聚光器的设计探讨》, 1982 年 6 月会议资料。
- [6] A.Rabl , Comparison Of Solar Concentrators, Solar Energy, Vol 18 PP93(1976)
- [7] R.Winston and Hinterberger, Principles Of Cylindrical Concentrators for Solar Energy, Solar Energy, Vol 17 PP255-258 (1975)
- [8] A.Rabl, Optical and Thermal Properties Of Compound Parabolic Concentrator, Solar Energy, Vol 18 PP497-511(1976)
- [9] A.Rabl et al, Practical Design

- Considerations for CPC Solar Collectors,
Solar Energy, Vol 22 PP373 (1979)
- [10] A. Rabii, J. O. Gallagher, Design and Test Of
Non-Evacuated Solar Collectors With
Compound Parabolic Concentrators, Solar
Energy, Vol 25, PP335-351 (1980)
- [11] R. E. Jones, Circular ARC Approximations Of
Truncated CPC Collectors, Solar Energy, Vol. 2
25, PP 139~147(1980)
- [12] C. K. Hsieh, Thermal Analysis Of CPC Collectors
Solar Energy, Vol 27 PP19~29 (1981)
- [13] 中科院广州能源研究所, 郑振宏, 符会利, 黄志成《CPC集
热器性能分析》鉴别材料之七, 1984年11月。
- [14] 中科院广州能源研究所, 黄志成, 郑振宏等《单体式复合抛物
面聚光器的试验研究》、鉴定材料之二, 1984年11月
- [15] 华中工学院, 程尚模, 陈志远, 刘伟《CPC真空管盖太阳能
集热器的热性能及效率分析》, 华中工学院学报, 1983年第
3期。
- [16] 华中工学院, 陈志远, 王崇琦, 张建国《真空管集热器配复合
抛物面的研究》, 华中工学院学报, 1983年第3期。
- [17] 重庆大学太阳能科研组《具有真空管接收器的3x CPC太阳
能集热器的截短试验》, 1982年5月会议资料。
- [18] Houands, K. G. T. 'Studies Of Methods Of
Reducing Heat Losses from Heat Plate Solar
Collectors', Annual Progress Report for

ERDA Contract E(11-)2597, Coo-2591-1

University Of Waterloo, Sep 1975

- [19] Baldwin, C.M. et al, "Performance Of Transparent Glass Honeycomb in Flat Plate Collectors", 1975 Int Solar Energy, Soc Congress and Exposition, Loss Angeles (1975)
- [20] Buchberg, H. and Edwards, D.K., "Design Consideration for Solar Collectors With Cylindrical Glass Honeycombs" 1975 Int. Solar Energy Soc Congress and Exposition, Loss Angeles(1975)
- [21] Marshall, K.N. et al, "Thermal Radiation Characteristics Of Transparent Plastic Honeycombs for Solar Collectors Applications 1975 Intl, Solar Energy Soc Congress and Exposition Loss Angeles (1975)
- [22] 浙江大学张诗针等《平板型蜂窝集热器的试验研究》，鉴定材料1982 11
- [23] Koyasu-Cho, Hamamatsu-Shi, Shizuoka-ken, "Improve Flat Plate Solar Collectors With V-Corrugated Transparent Insulator", Airconditioning R & D Laboratories, Yazaki Kesource Co., LTD. Japan
- [24] E.M. Sparrow, R.D. Cess: "Radiation Heat

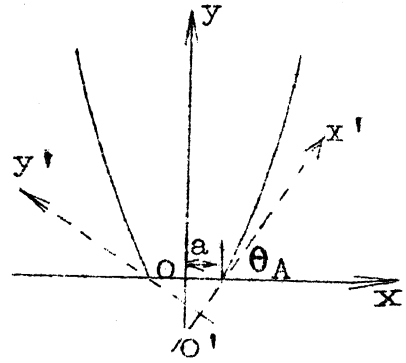
- Transfer" , McGraw-Hill, 1978
- [25] John A. Duffie, William A. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes" , 1980
- [26] S.M. Elsherbini, K.G.T. Hollands, G.D. Raithby, "Free Convection across Inclined Air Layers With one Surface V-Corrugated" University of Waterloo, Canada
- [27] H. Buchberg I. Catton, D.K. Edwards, "Natural Convection in Enclosed Space—A Review Of Application to Solar Energy Collection" , Transactions Of the ASME, 1821 May 1976
- [28] J.E. Hill et al. , Development Of Proposed Standards for testing Solar collectors and thermal storage devices, NBS Tech Note 899, PP 112(1976)
- [29] Aden B. Meinel, Marjorie P. Meinel, "Applied Solar Energy—An Introduction" , May 1979

十、附 录

A、抛物线方程的推导

(1) 右边抛物线方程的推导

如图 40 所示, 在以抛物线顶点为原点 O' , 抛物线轴为 y' 轴的坐标 $x'O'y'$ 中, 右抛物线方程为:



$$y' = \frac{1}{4f} x'^2 \quad (79)$$

图 40

式中: $f = a(1 + \sin\theta_A)$

(80)

a —— 吸收面长度的一半

θ_A —— 反射面的接收半角

我们可以通过旋转, 平移将 $x'O'y'$ 中的方程转化成 xOy 中的方程。由于在坐标系 xOy 中 O' 点的坐标为 $(g = f\sin\theta_A - a, h = f\cos\theta_A)$, 于是可以写出坐标变换公式:

$$x' = (x-g)\cos\theta_A + (y-h)\sin\theta_A \quad (81)$$

$$\begin{cases} y' = -(x-g)\sin\theta_A + (y-h)\cos\theta_A \end{cases} \quad (82)$$

即 $x' = x\cos\theta_A + y\sin\theta_A + U \quad (83)$

$$\begin{cases} y' = -x\sin\theta_A + y\cos\theta_A + V \end{cases} \quad (84)$$

式中 $U = -g\sin\theta_A - h\cos\theta_A \quad (85)$

$$\begin{cases} V = g\cos\theta_A - h\sin\theta_A \end{cases} \quad (86)$$

将坐标变换公式(83), (84)式代入(79)式中可得

$$\cos^2\theta_A \cdot x^2 + \sin\theta_A \cdot y^2 + \sin 2\theta_A \cdot xy + (2U\cos\theta_A + 4f\sin\theta_A)x + (2U\sin\theta_A - 4f\cos\theta_A)y + (U^2 - 4fV) = 0 \quad (87)$$

若令: $A_1 = \cos^2\theta_A$; $A_2 = \sin^2\theta_A$; $A_3 = \sin 2\theta_A$; $A_4 = 2U\cos\theta_A + 4f\sin\theta_A$; $A_5 = 2U\sin\theta_A - 4f\cos\theta_A$; $A_6 = U^2 - 4fV$

则可得右抛物线在 xOy 坐标系中的方程:

$$A_1x^2 + A_2y^2 + A_3xy + A_4x + A_5y + A_6 = 0 \quad (88)$$

(2) 右边抛物线方程

由于反射面是关于 y 轴对称的, 所以右边方程为:

$$A_1x^2 + A_2y^2 - A_3xy - A_4x + A_5y + A_6 = 0 \quad (89)$$

式中各系数与前面一样。

B、入射光线与反射面的交点

(1) 入射角 $\theta_1 = 0$ 时

$$x = x_0 \quad (90)$$

$$\begin{cases} A_1x^2 + A_2y^2 + A_3xy + A_4x + A_5y + A_6 = 0 \end{cases} \quad (91)$$

将(90)式代入(91)式得

$$A_2y^2 + (A_3x_0 + A_5)y + (A_1x_0^2 + A_4x_0 + A_6) = 0 \quad (92)$$

令: $D_1 = A_2$; $D_2 = A_3x_0 + A_5$; $D_3 = A_1x_0^2 + A_4x_0 + A_6$;

$$D_4 = D_2^2 - 4D_1D_3$$

则(92)式变为:

$$D_1y^2 + D_2y + D_3 = 0 \quad (93)$$

当 $D_4 \geq 0$ 时, 交点为:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \\ y_1 = (-D_2 + \sqrt{D_4}) / 2D_1 \end{cases}; \quad \begin{cases} x_2 = x_0 \\ y_2 = (-D_2 - \sqrt{D_4}) / 2D_1 \end{cases}$$

(2) 入射角 $\theta_1 \neq 0$ 时

$$\begin{cases} y = Kx + B \end{cases} \quad (94)$$

$$A_1 x^2 + A_2 y^2 + A_3 xy + A_4 x + A_5 y + A_6 = 0 \quad (95)$$

将 (94) 式代入 (95) 式得

$$(A_1 + A_2 K^2 + A_3 K)x^2 + (2A_2 KB + A_3 B + A_4 + A_5 K)x + (A_2 B^2 + A_5 B + A_6) = 0 \quad (96)$$

令: $D_1' = A_1 + A_2 K^2 + A_3 K$; $D_2' = 2A_2 KB + A_3 B + A_4 + A_5 K$;

$D_3' = A_2 B^2 + A_5 B + A_6$; $D_4' = D_2'^2 - 4D_1' D_3'$

则 (96) 式变成:

$$D_1' x^2 + D_2' x + D_3' = 0 \quad (97)$$

若 $D_1' = 0$, $D_2' \neq 0$, 则交点为 $\begin{cases} x = -D_3' / D_2' \\ y = Kx + B \end{cases}$

若 $D_1' = 0$, $D_2' = 0$ 则无交点。

若 $D_1' \neq 0$, $D_4' \geq 0$, 则交点为:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = (-D_2' + \sqrt{D_4'}) / 2D_1' \\ y_1 = Kx_1 + B \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} x_2 = (-D_2' - \sqrt{D_4'}) / 2D_1' \\ y_2 = Kx_2 + B \end{array} \right.$$

若 $D_1' \neq 0$, $D_4' < 0$, 则无交点。

C 反射光线斜率的推导

(1) 入射角 $\theta_i \neq 0$ (K 为有理值)

时

设入射光线与反射面的交点为 (x', y') , 则反射面在交点处的法线斜率为:

$$K_n = \frac{dx}{dy} = \frac{2A_2y' + A_3x' + A_5}{2A_1x' + A_3y' + A_4}$$

(98)

如图 41 所示, 由“入射角 = 反射角”可得

$$\frac{K_n - K}{1 + K_n K} = \frac{K' - K_n}{1 + K' K_n} \quad (99)$$

$$\text{于是 } K' = (K_n^2 K + 2K_n - K) / (1 + 2K_n K - K_n^2) \quad (100)$$

(2) 入射角 $\theta_i = 0$ ($K = \infty$) 时

由 (100) 式, 令 $K = \infty$ 可推得:

$$K' = (K_n^2 - 1) / 2K_n \quad (101)$$

(3) 当 $1 + 2K_n K - K_n^2 = 0$ 时

$$\text{由 (100) 式可推得: } K' = \infty \quad (102)$$

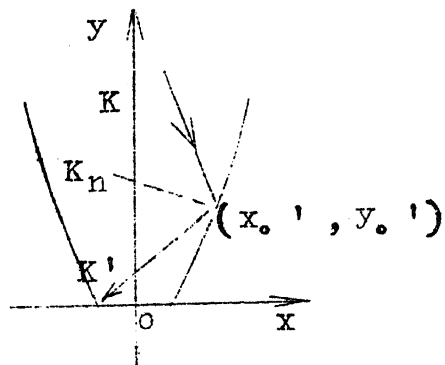


图 41

D、吸热面，V形膜及玻璃盖板之间辐射换热量的推导

由于V形膜对红外辐射有一定的透过能力，这使吸收面，V形膜及玻璃盖板之间的辐射换热变得复杂起来，图4.2是三者之间辐射换热网络图。

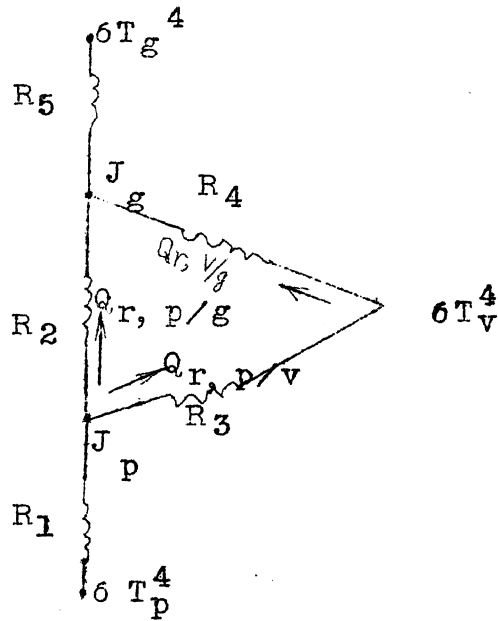


图4.2 吸收面，V形膜及盖板之间辐射换热网络图

$$R_1 = \frac{1 - \epsilon_p}{A_p \epsilon_p}; R_2 = \frac{1}{A_p \tau_v}; R_3 = \frac{1}{A_p \epsilon_v}; R_4 = \frac{1}{A_g \epsilon_v}; R_5 = \frac{1 - \epsilon_g}{A_g \epsilon_g}$$

J_p, J_g 为有效辐射

$$\text{对于节点 } J_p: \frac{6T_p^4 - J_p}{R_1} = \frac{J_p - J_g}{R_2} + \frac{J_p - 6T_v^4}{R_3} \quad (103)$$

$$\text{对于节点 } J_g: \frac{6T_v^4 - J_g}{R_4} + \frac{J_p - J_g}{R_2} = \frac{J_g - 6T_g^4}{R_5} \quad (104)$$

由方程 (103), (104) 可求得

$$J_p = \frac{(R_2 R_4 + R_5 + R_2 R_5)(R_2 R_3 6T_p^4 + R_1 R_2 6T_v^4) + R_1 R_3 (R_2 R_4 6T_g^4 + R_2 R_5 6T_v^4)}{(R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3)(R_2 R_4 + R_4 R_5 + R_2 R_5) - R_1 R_3 R_4 R_5} \quad (105)$$

$$J_g = \frac{1}{R_1 R_3} [(R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3) J_1 - R_2 R_3 6T_p^4 - R_1 R_2 6T_v^4] \quad (106)$$

求出有效辐射 J_p , J_g 后, 就可以求得吸热面与 v 形膜之间的辐射换热量 $Q_{r, p/v}$, 吸热面与盖板之间的辐射换热量 $Q_{r, p/g}$ 以及 v 形膜与盖板之间的辐射换热量 $Q_{r, v/g}$

$$Q_{r, p/v} = \frac{J_p - 6T_v^4}{R_3} \quad (107)$$

$$Q_{r, p/g} = \frac{J_p - J_g}{R_2} \quad (108)$$

$$Q_{r, v/g} = \frac{6T_v^4 - J_g}{R_4} \quad (109)$$

Abstract

A medium temperature solar collector was proposed which takes a flat-plate collector with V-corrugated transparent insulator as the absorber and a compound parabolic concentrator as the reflector. The collector is called FPV-CPC for short. In this paper, the theoretical, experimental results and comparison between them were presented. Using the ray-tracing technique, the variation of the optical efficiency and the number of reflections with the angle of incidence were expounded, in consideration of the variation of the transmittance of the glass cover and the absorptance of the absorber with the angle of incidence. Mathematical model for the thermal process was established in the paper, and the thermal performance of the collector were analysed in a greater detail through solving four nonlinear, simultaneous equations by means of SOR. Also, the main performance indexes of the collector were tested in the medium temperature solar test installation. The theoretical and experimental results show that FPV-CPC performs well when working in the

medium temperature range of 70~110°C which is simple in construction ,easy in manufacture and cheap in cost ,so it has practical and spreading value .