

涂层的光学性能与平板集热器效率的模拟研究

方 铎 荣

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文通过对平板集热器瞬时热效率的电子计算机模拟实验,进行了涂层的光学性能与平板集热器效率的研究。给出了 $\eta-a_s/\varepsilon$ 曲线,得到了提高平板集热器效率的合理措施,提出了从 $\eta-a_s/\varepsilon$ 曲线寻求热效率最佳涂层的方法。并且还根据上述方法,对于平板集热器涂层的研制,指出了努力的方向。

一、前 言

选择性吸收涂层的光学性能与基底的光洁度、涂层的厚度等密切相关。铜黑(氧化铜涂层)的光学性能与它底材光洁度的关系如表1所示。选择性漆涂层涂在一定的金属底材上,

表1 铜基底对氧化铜涂层光学性能的影响

基底性质	涂层光学参数	α_s	ε	α_s/ε
经机械抛光		0.88	0.18	4.9
未经机械抛光		0.94	0.56	1.7

其光学性能不仅与基底的材料特性有关,而且 α_s 与 ε 值随涂层的厚度增加而增加,但两者增加速度不等^(2,3)。有一种以黑氧化铁为颜料,以改性有机硅作粘合剂的商用涂料,涂在铝、钢与镀锌钢底材上,其光学性能按厚度增加顺序排列如表2所示。

可见,选用不同的涂层,收益不同。但由于工艺不同,造价也会有很大差别,如果盲目使用,就会得不偿失,文献[1]已经给出了提高平板集热器效率的 α_s/ε 的合理范围。Tabor准则可以用来确定表2中一组热效率最佳的光学性能及其对应的涂层厚度。Tabor准则给出的是最大日平均效率时所对应的 α_s 与 ε 值,但还未能给出最大日平均效率的数值,也未能给出其他组数据与最大日平均效率相差多少,因而难以在不同的涂层成本下,确定其最佳值。本文对典型的玻璃盖板平板集热器,在目前用作提供热水、采暖、发电、致冷的典型运行状态下,用电子计算机进行模拟实验,得到涂层的光学性能与平板集热器效率的一组曲线。从这一组曲线出发,可以寻求热效率最佳涂层;并从热效率观点出发,为研制平板集热器涂层指出了努力方向。

表 2 不同厚度的选择性漆涂层的光学性能

铝		钢		镀	锌	钢
α_s	ε	α_s	ε	α_s	ε	
0.38	0.06*	0.48	0.08*	0.48	0.14*	
0.57	0.12	0.62	0.11	0.71	0.20	
0.68	0.14	0.79	0.17	0.81	0.23	
0.76	0.18	0.86	0.22	0.91	0.33	
0.86	0.28	0.89	0.28	0.96	0.83	
0.88	0.33	0.93	0.36			
0.90	0.36	0.96	0.83			
0.93	0.45					

* 为底衬性质

二、涂层光学性能与平板集热器效率的计算

太阳能平板集热器的瞬时效率计算采用文献[4]介绍的方法。

$$\eta = \alpha_s \tau - U_L \frac{T_p - T_a}{I} \quad (1)$$

式中, α_s ——集热板表面涂层的太阳吸收率, τ ——玻璃盖板透过率, T_p ——吸热板平均温度, T_a ——环境温度, I ——投射在平板集热器上的太阳辐射强度, U_L ——总热损失系数。

由(1)式来计算在不同日照、风速、环境温度下, 集热器表面涂层的光学性能对集热器瞬时效率的影响。

集热器的计算参数如下:

集热板温 $T_p = 45, 65, 85, 105(^{\circ}\text{C})$; 夹层厚度 $L = 4(\text{厘米})$; 南向倾角 $\theta = 45^{\circ}$; 玻璃的透过率 τ , 单层为 0.88, 双层为 0.79; 玻璃的发射率 $\varepsilon_c = 0.88$; 背、侧面热损系数 $U_b = 0.99(\text{瓦}/\text{米}^2\text{C}^{\circ})$; 涂层的吸收率 $\alpha_s = 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75$; 涂层的发射率 $\varepsilon_p = 0.95, 0.75, 0.55, 0.35, 0.15, 0.10, 0.05, 0.02$; 日照 $I = 900, 700, 500(\text{瓦}/\text{米}^2)$; 风速 $v = 0, 2.5, 5(\text{米}/\text{秒})$; 环境温度 $T_a = 10(^{\circ}\text{C}) = 283(\text{K})$ 。

单层玻璃盖板平板集热器的计算

- $h_w = 5.7 + 3.8v$
- $h_{p-c} = \left\{ 1 - 0.0018 \left[\frac{(T_p + T_c)}{2} - 283 \right] \right\} 1.14 \frac{(T_p - T_c)^{0.31}}{L^{0.07}}$
- $h_{r, p-c} = \frac{5.6697 \times 10^{-8} (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_c - 1}$
- $h_{r, c-s} = \varepsilon_c \cdot 5.6697 \times 10^{-8} (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s)$
- $U_L = \left[\frac{1}{h_{p-c} + h_{r, p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r, c-s}} \right]^{-1}$

$$6. \quad T_c = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{p-c} + h_{r,p-c}}$$

$$7. \quad U_L = U_t + U_b$$

$$8. \quad \eta = \alpha_s \tau - \frac{U_L(T_p - T_a)}{I}$$

式中, h_w ——风对玻璃盖板的换热系数, h_{p-c} ——两块倾斜的平行平板之间的对流换热系数, $h_{r,p-c}$ ——集热板对玻璃盖板的辐射换热系数, T_c ——玻璃盖板的温度, T_s ——天空温度, $h_{r,c-s}$ ——玻璃盖板对天空的辐射换热系数, U_t ——从集热器吸热板到环境的顶部热损失系数。

双层玻璃盖板平板集热器的计算

$$1. \quad h_w = 5.7 + 3.8v$$

$$2. \quad h_{p-c1} = \left\{ 1 - 0.0018 \left[\frac{(T_{c1} + T_p)}{2} - 283 \right] \right\} 1.14 \frac{(T_p - T_{c1})^{0.31}}{L_1^{0.07}}$$

$$3. \quad h_{r1} = \frac{5.6697 \times 10^{-8} (T_p^2 + T_{c1}^2) (T_p + T_{c1})}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_c - 1}$$

$$4. \quad R_3 = \frac{1}{h_{p-c1} + h_{r1}}$$

$$5. \quad h_{c1-c2} = \left\{ 1 - 0.0018 \left[\frac{(T_{c1} + T_{c2})}{2} - 283 \right] \right\} 1.14 \frac{(T_{c1} - T_{c2})^{0.31}}{L_2^{0.07}}$$

$$6. \quad h_{r2} = 5.6697 \times 10^{-8} (T_{c1}^2 + T_{c2}^2) (T_{c1} + T_{c2}) / (2/\varepsilon_c - 1)$$

$$7. \quad R_4 = 1 / (h_{c1-c2} + h_{r2})$$

$$8. \quad h_{r6} = 5.6697 \times 10^{-8} \varepsilon_c (T_{c2}^2 + T_s^2) (T_{c2} + T_s) \frac{(T_{c2} - T_s)}{(T_{c2} - T_a)}$$

$$9. \quad R_6 = \frac{1}{h_w + h_{r6}}$$

$$10. \quad U_t = \frac{1}{R_3 + R_4 + R_6}$$

$$11. \quad T_{c1} = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{p-c1} + h_{r1}}$$

$$12. \quad T_{c2} = T_{c1} - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{c1-c2} + h_{r2}}$$

$$13. \quad U_L = U_t + U_b$$

$$14. \quad \eta = \alpha_s \tau - \frac{U_L(T_p - T_a)}{I}$$

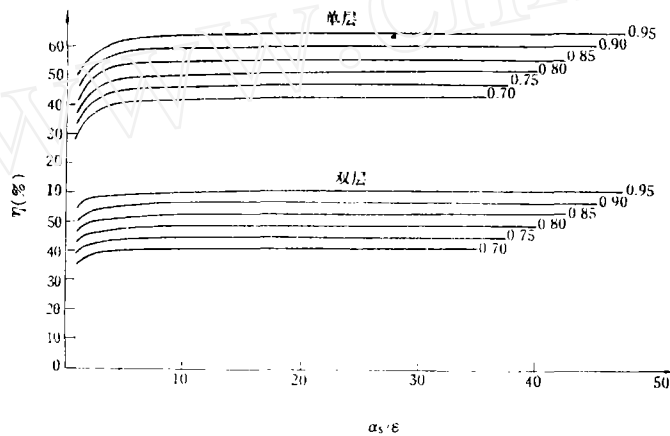
式中, h_{p-c1} ——从集热板到第一层玻璃盖板之间的对流换热系数; T_{c1} 、 T_{c2} ——靠近集热板的玻璃盖板与第二层玻璃盖板的温度; h_{r1} 、 h_{r2} 、 h_{r6} ——分别为集热板对第一层玻璃盖板、两层玻璃盖板之间、第二层玻璃板对天空的辐射换热系数; R_3 、 R_4 、 R_6 ——分别为集热板与第一层玻璃盖板、玻璃盖板之间、第二层玻璃盖板对环境的热阻; h_{c1-c2} ——玻璃盖板间的对流换热系数; L_1 、 L_2 ——集热板到第一层玻璃板及玻璃盖板之间的夹层间距, 此处 $L_1 = L_2 = L$; T_s ——天空温度。

上述计算中,假定 $T_a = T_s$, 采用迭代法反复试算玻璃盖板温度, 达到规定的精度后, 得到顶部热损系数, 进一步计算可得到平板集热器效率。

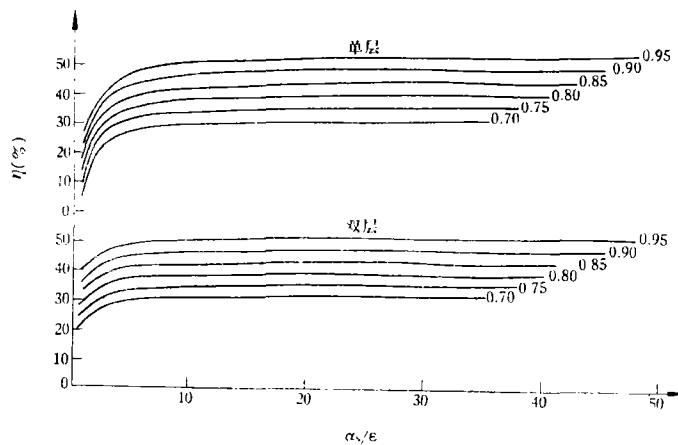
三、计算机模拟实验结果及分析

图 1(a)–(d)是以 $\eta - \alpha_s/\varepsilon$ 为座标、以 α_s 为参变量的一组曲线。从图可以看出:

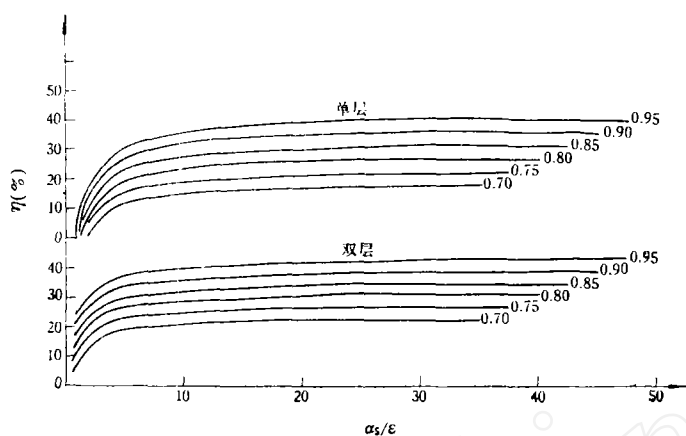
1. 单、双层玻璃平板集热器在本文模拟状态下, 其集热板工作温度小于 105°C 时, α_s/ε 不需要超过 10, 而 α_s 值则愈高愈好。因此, 标志涂层光学性能的参数是 α_s 和 ε (或 α_s/ε), 那种仅以 α_s/ε 参数来评价选择性吸收涂层光学性能优劣的观点是不全面的。在不保证高 α_s 值情况下, 片面追求 α_s/ε 的高指标, 不论在平板集热器热设计上, 还是在涂层的生产、研制中都是值得商榷的。尤其当采用平板集热器作为热水器的主要部件时, 它的平均工作温度在 45°C 左右, 从图 1(a) 可以看到, α_s/ε 不需要超过 4, 而提高 α_s 值更为重要。假如以黑漆 ($\alpha_s = 0.95, \alpha_s/\varepsilon = 1$) 涂层在单层平板集热器的效率这点 (图 1(a)) 作一条平行于横座标的直线, 那末可以得一系列与黑漆等效的选择性吸收涂层。显然 α_s 低于 0.76 的任何选



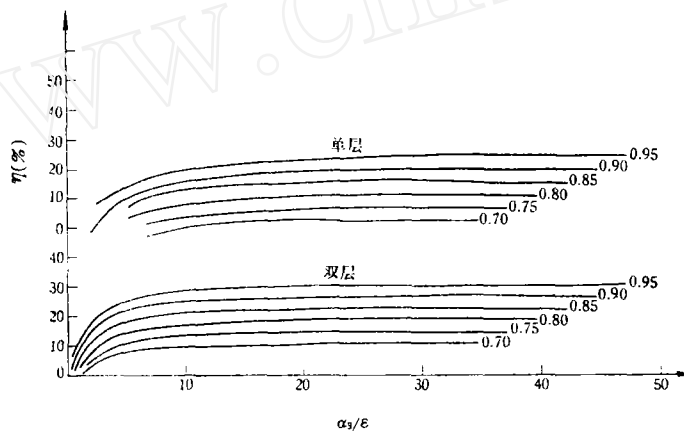
(a) 工作温度 45°C



(b) 工作温度 65°C



(c) 工作温度 85°C



(d) 工作温度 105°C

图1 涂层的光学性能对单、双层玻璃平板集热器效率的影响
风速 2.5 米/秒, 日照强度 700 瓦/米²

选择性吸收涂层的效率都低于黑漆涂层。黑漆与 $\alpha_s=0.90$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=1.5$ 、 $\alpha_s=0.85$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=2.25$ 、 $\alpha_s=0.80$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=6.25$ 等的选择性涂层等效。假如采用 $\alpha_s=0.95$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=4$ 的选择性涂层, 则可达到 62% 的效率。而要达到 65% 的效率, 则要求 $\alpha_s=0.95$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=20$; 而当 $\alpha_s=0.90$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=45$ 时, 也只能达到 61% 的效率。因此, 提供低温热水的平板集热器的选择性涂层的研制方向是高吸收率 (>0.90)、中等的 α_s/ε 比 (4—5)。从图 1(a) 还可以看出, 单、双层玻璃集热器的效率相差不大。从经济观点出发, 采用单层玻璃的平板集热器更为合理。

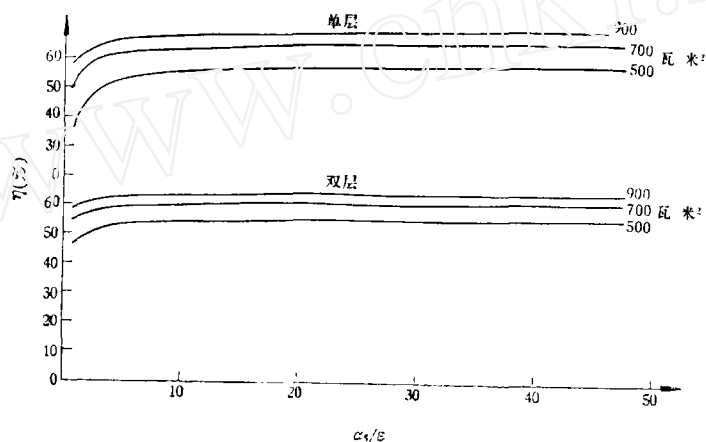
2. 图 1(a)–(d) 表明, 单层比双层玻璃平板集热器的效率随 α_s/ε 的增加上升得快。这是由于随着 α_s 、 α_s/ε 的增大, 对流与辐射损失下降, 同时, 玻璃层数加多所取得的收益小于其 τ 值下降所造成的损失。因此, 单层比双层玻璃的平板集热器更需要采用选择性涂层。例如, 从图 1(a) 可得到, 若采用 $\alpha_s=0.95$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=1$ 的黑漆涂层, 单层的效率为 50%,

双层为 54%；若采用 $\alpha_s=0.95$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=3$ 的选择性吸收涂层，则单层的效率为 59.5%，而双层为 58%。

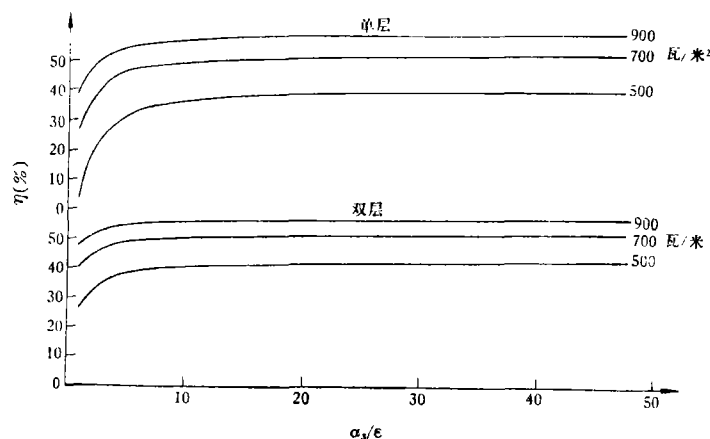
3. 随着平板集热器工作温度的提高，选择性吸收涂层对效率的影响愈来愈明显。例如用于采暖的平板集热器的工作温度要比环境温度高 55℃。那末从图 2 可以看到，若采用非选择性的黑漆涂层，单层的效率为 26%，双层为 40%；若采用 $\alpha_s=0.95$ 、 $\alpha_s/\varepsilon=4$ 的选择性涂层，则单层的效率为 48%，效率增加了 22%，双层的效率为 49.5%，增加效率 9.5%。从图 1(a)、(d) 可以看到。一旦集热器工作温度大于 85℃ 时，必须采用选择性涂层，且 α_s/ε 参数的作用比集热器工作在低温时重要。

4. 从图 1(c)、(d) 看到，即使采用高 α_s 、 α_s/ε 的选择性吸收涂层，当集热器工作温度大于 85℃ 时，其最高效率只能达 43%，为了提高集热器的效率，还必须采取其他有效措施来减小对流的损失。如加蜂窝与抽真空等。

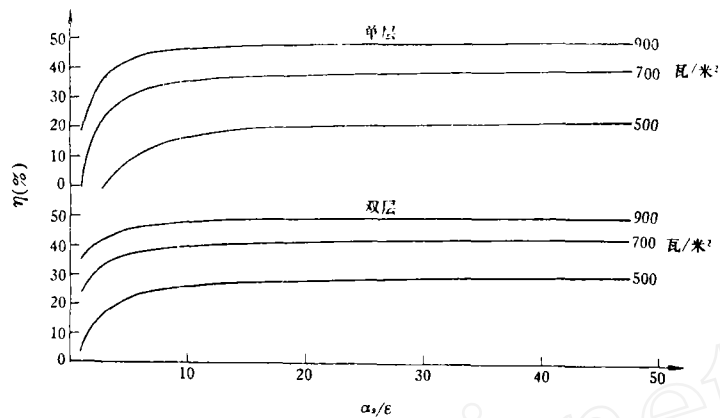
图 2(a)–(d) 是以 $\eta-\alpha_s/\varepsilon$ 为座标，以日照强度为参变量的一组曲线，从图可以看出：



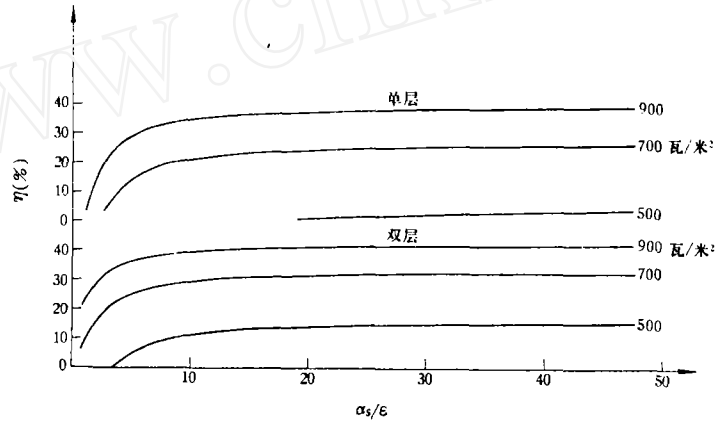
(a) 工作温度 45℃



(b) 工作温度 65℃



(c) 工作温度 65°C



(d) 工作温度 105°C

图 2 涂层的光学性能、日照强度对单、双层玻璃平板集热器效率的影响
风速 2.5 米/秒, 吸收系数 0.95

5. 随着集热器工作温度的提高, 日照强度对效率的影响愈来愈大。在低日照强度情况下, 采用选择性涂层更为有利, 且更需要采用有效的抑制对流措施。否则, 集热器的效率是相当低的。

6. 日照强度的变化对双层玻璃平板集热器影响小。在低日照强度(500 瓦/米²)和低 α_s/ϵ (≤ 3) 选择性涂层时, 采用双层玻璃盖板更有效。

图 3(a)~(d) 是以 $\eta-\alpha_s/\epsilon$ 为座标、以风速为参变量的一组曲线。从图可以看出:

7. 随着集热器工作温度的提高, 风速对效率的影响愈来愈大。采用选择性吸收涂层, 可减小风速对效率的影响。

8. 风速对双层玻璃平板集热器效率的影响比单层的小。若采用黑漆等非选择性涂层, 风速愈大, 双层比单层玻璃的平板集热器效率高得越多。

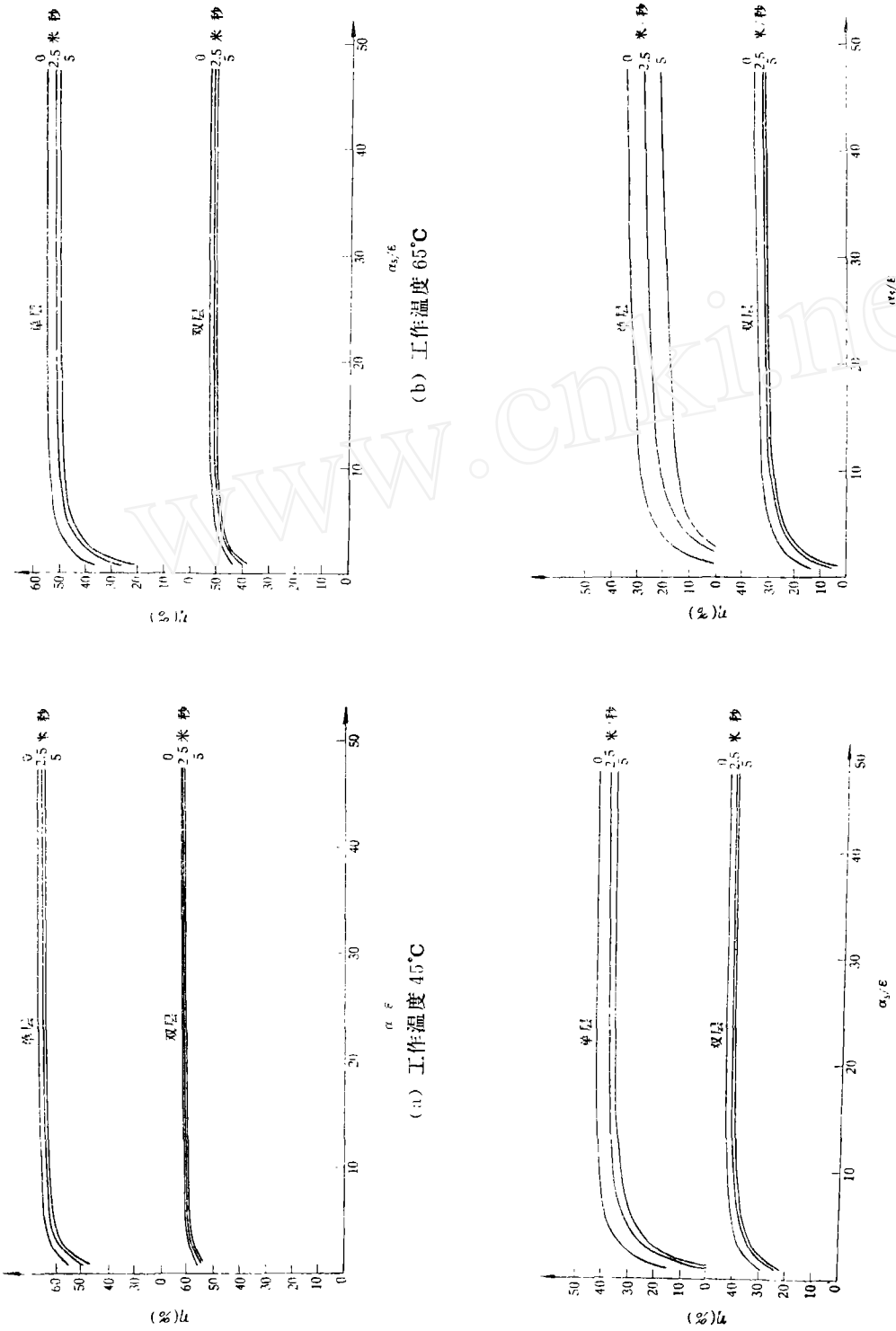


图 3 涂层光学性能、风速对单、双层玻璃平板集热器效率的影响
日照强度 700 瓦/米², 吸收系数 0.95

四、从 $\eta-a_s/\varepsilon$ 曲线求最佳热设计涂层

平板集热器的热设计中, 经常需要回答采用什么样光学性能的涂层, 可以使平板集热器的瞬时效率高而且经济性好的问题。利用以 $\eta-a_s/\varepsilon$ 为座标、以 a_s 为参变量的曲线, 可以回答上述问题。例如若将我国目前研制的选择性涂层(1979年西安太阳能会议展出的), 用于冬季采暖的玻璃平板集热器上, 从图1(b)的曲线中可求得每种涂层的单、双层集热器效率, 结果列于表3。热效率的高低以涂层的序号排列为:

$$\eta(\text{单层})[10]>[3]>[2, 13]>[1]>[7]>[8, 11]>[4]>[6, 12]>[9]>[5]$$

$$\eta(\text{双层})[10]>[2]>[3]>[13]>[1]>[4]>[7]>[8, 11]>[12]>[6]>[9]>[5]$$

表3 从 $\eta-a_s/\varepsilon$ 曲线求得的热效率结果

序号	涂 层 名 称	a_s	ε	a_s/ε	η (%) (单层)	η (%) (双层)	研 制 单 位
1	化学涂镍电镀黑铬	0.91	0.14	6.5	45	45.8	上海硅酸盐所
2	化学涂铜黑	0.91	0.12	7.6	45.8	46.8	
3	电镀黑铬	0.90	0.09	10.0	46	46.7	
4	PP3型半导体黑漆	0.95	0.60	1.6	36.5	44	
5	PP2型半导体黑漆	0.87	0.50	1.7	30	38	
6	选择性吸收涂料	0.89	0.4	2.2	35	41	化工部涂料所
7	EP选择性吸收涂料	0.90	0.22—0.35	3.2	39.8	43.5	北京化工学院
8	FP选择性吸收涂料	0.90	0.23—0.40	2.9	38.4	43.0	
9	92*选择性吸收涂料	0.91	0.50	1.8	33	40.6	天津油漆总厂涂料所
10	电镀黑铬	0.97	0.12	8.1	52	51.6	北京市太阳能所
11	沥青硫化铅漆涂料	0.90—0.92	0.3—0.4	2.6	38.4	43	
12	沥青硫化铅漆涂料	0.92—0.94	0.5	1.9	35	42	
13	化学涂铜黑	0.90	0.10	9	45.8	46.5	北京力学所

又如文献[5]给出的十五种实验漆涂层的光学性能, 求用作热水器系统的平板集热器的最佳效率涂层, 其结果示于表4。

从表中可得到各种涂层对应热效率的排列顺序为

$$[15]>[9, 14]>[13]>[10, 12, 8]>[11]>[4]>[6]>[1]>[5]>[2]>[3]>[7]$$

显然, [9]与[14]、[10]、[12]、[8]分别是用作热水器上的不同的等效涂层。

若把上述十五种漆涂层与非选择性黑漆涂层的效率及成本进行对比, 可以粗略地找出最佳热设计涂层。例如, $\eta_{\text{黑漆}}$ 为 50%, 它与[1]为等效涂层, 它比[5]、[2]、[3]、[7]涂层有效,

表 4 由 $\eta-\alpha_s/\varepsilon$ 曲线求最佳漆涂层结果

序号	配比, 颜料体积百分比浓度	厚 度 (密耳)	α_s	ε	α_s/ε	η (%) (单层)
1	30PVC, PbS 在 PP 中	0.80	0.92	0.80	1.2	50
2	30PVC, CdTe 在 EPDM 中	1.0	0.88	0.80	1.1	45.5
3	30PVC, Sb ₂ Se ₃ 在 EPDM 中	1.0	0.80	0.53	1.5	42
4	30PVC, F-6331* 在 PP 中	1.0	0.95	0.90	1.1	51
5	30PVC, PbS 在 EPDM 中	0.30	0.91	0.68	1.3	49
6	30PVC, CdTe 在 EPDM 中	0.20	0.88	0.49	1.8	50.5
7	30PVC, Si 在 EPDM 中	0.25	0.79	0.56	1.4	41
8	20PVC, Meteor 7890** 在 EPDM 中	0.18	0.92	0.36	2.6	56
9	30PVC, F-6331 在有机硅中	0.07	0.93	0.34	2.7	57
10	30PVC, F-6331 在 PE 中	0.06	0.92	0.36	2.6	56
11	30PVC, F-6331 在 PP 中	0.06	0.93	0.43	2.2	55.4
12	30PVC, F-6331 在 EPPM 中	0.05	0.90	0.27	3.3	56
13	20PVC, F-6331 在 EPPM 中	0.07	0.91	0.30	3.0	56.3
14	10PVC, F-6331 在 EPPM 中	0.05	0.90	0.24	3.8	57
15	5PVC, F-6331 在 EPPM 中	0.05	0.93	0.32	2.9	57.4

* FeMn-CuO_x 美 Ferro 公司产品

** Cu-CrO_x 美 Harshaw 公司产品

而比〔15〕、〔9〕、〔14〕等 10 种涂层效率低。如果采用〔15〕涂层, 其效率比黑漆涂层高 7.4%, 但倘若〔15〕涂层比黑漆涂层的价格高出黑漆型平板集热器价格的 7.4%。时, 则从成本效率观点看, 它比不上黑漆型平板集热器。

又如前言中提到的以铜为基底的氧化铜涂层, 其基底的抛光与否对涂层的光学性能有很大的影响。假如涂层用在热水器系统的平板集热器上, 据表 1 的涂层光学参数, 基底未抛光的氧化铜涂层, $\eta_{\text{单层}}$ 为 55%; 基底抛光后的氧化铜涂层 $\eta_{\text{单层}}$ 为 56.4%。两者的效率仅差 1.4%, 从省掉抛光工艺、降低涂层成本考虑, 采用未抛光的氧化铜涂层可能更合理些。

五、结 论

1. 一种有效的选择性吸收涂层, 必须具有高的太阳热吸收率 ($\alpha_s \geq 0.90$) 和低的热发射率 ($\alpha_s/\varepsilon \leq 10$), 片面追求 α_s/ε 的高指标, 对平板集热器的效率提高不大。尤其对用于低温热水的平板集热器而言, 有效的选择性吸收涂层是高的太阳热吸收率 ($\alpha_s > 0.90$) 和中等的 α_s/ε 值 (4—5)。在改进上述涂层性能时, α_s 的增加比 ε 的减小能更有效地提高平板集热器的效率。

2. 当平板集热器的工作温度超过85℃时, 加上低日照与风速的影响, 除采用有效的选择性吸收涂层外, 还必须采取其他措施来减小对流损失(加蜂窝与抽真空等), 才能进一步提高平板集热器的效率。

3. 当采用黑漆或选择性漆涂层时($\alpha_s \geq 0.90$, $\alpha_s/\varepsilon \leq 3$), 为了使平板集热器在低日照和有风时, 仍具有较高的效率, 采用双层玻璃盖板比单层好。

4. 从 $\eta-\alpha_s/\varepsilon$ 曲线来寻求平板集热器效率最佳涂层是一种直观、简便的方法。它用来筛选现有的涂层, 能粗略地从成本效率观点来选用最佳涂层, 还可为某种涂层的实际应用, 合理地确定其光学性能参数, 以便选定涂层的合理工艺。

本文得到清华大学李元哲同志的许多帮助, 在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 李元哲, “提高平板集热器集热效率的合理措施”, 太阳能学报, 第2卷第1期, p.33, 1981.
- [2] C. S. Moore et al, Solar Technology in the Seventies, *Sharing the Sun*, Vol. 6, p. 187, 1976.
- [3] 赵玉文, 选择性吸收表面与集热器效率研究, 太阳能学报, 第1卷第1期, 1980, p.45
- [4] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, New York, 1974.
- [5] H. Y. B. Mar, R. E. Peterson, P. B. Eimmer, 太阳能利用译文集, 上集, 57, 科学文献出版社, 1980.

ON THE STUDY OF SIMULATION BETWEEN THE OPTICAL PERFORMANCES OF COATING AND THE EFFICIENCY OF FLAT-PLATE COLLECTOR

Fang Duo-rong

(*Institute of Mechanics of the Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

Based on the similar experiment of transient efficiency of flat-plate collector completed by computer, this paper has studied the relation between the optical performances of coating and the efficiency of flat-plate collector. It is the $\eta-\alpha_s/\varepsilon$ curves. Therefore, we have obtained rational measures for elevation efficiency of flat-plate collector; Simultaneously a method has been proposed, by which the best optimal coating of flat-plate collector in thermal efficiency can be found through $\eta-\alpha_s/\varepsilon$ curves; from the point of view of thermal efficiency, this paper also propose an orientation on how to make and improve the coatings of the flat-plate collectors.