

專 論

鋁管式太陽能收集器之實用設計研究

Studies on the Design of An Aluminum-Tube Solar Collector

國立臺灣大學農機系教授

張 漢 聖

H. S. Chang

摘 要

鋁管式太陽能收集器構造簡單，製作容易，不失為物美價廉太陽能收集器設計型式之一。

以熱流網路模擬鋁管式太陽能收集器之熱傳顯示，欲使太陽能收集器有較佳之集熱效率，則應採用直徑較小之鋁管，但必須兼顧管內空氣流速約在 5 m/s。如管內流速超過 5 m/s 甚多，則應取用直徑較大之鋁管，以降低管內空氣流速，使達於最適設計流速。

ABSTRACT

The solar collector with corrugated aluminum tubes as heat absorber is a simple and low-cost solar collector.

The computer model was developed to simulate the performance of the solar collector.

The relationship between the collector efficiency and the size of aluminum tubes as well as the relationship between the collector efficiency and the velocity of air flow inside tubes were discussed in this paper.

一、前 言

鋁管式太陽能收集器前曾試用於鋼皮圓筒倉頂，以收集太陽熱能作為倉內穀物乾燥之用，初步試驗結果顯示成效尚佳⁽³⁾。惟因考慮到省產透明塑膠布易受污染壽命又短，作為太陽能收集器的面蓋仍有問題，以致遲遲未能再予推介利用。現今獲悉本省已能產製品質優良的透明塑膠布，耐久且不易污染，因之，鋁管式太陽能收集器，以其構造簡易，配以耐用之透明塑膠布為面蓋，允不失為物美價廉太陽能收集器設計型式之一。為期能善加利用鋁管式太陽能收集器，其性能實有必要作進一步了解。

前此，陳輝光君的碩士論文「圓筒倉頂鋁管太

陽能收集器之性能分析」⁽²⁾，立論精闢，很值得參考。本研究旨在澄清若干疑點，有關試驗數據早在七十六年即已完成，現以熱流網路加以分析討論，其結果可以作為實用設計之參考。

二、材料與方法

(一)試驗裝置

試驗研究用之鋁管式太陽能收集器如圖 1 所示。該器具有集熱面積 3.3 m²，底面為 1.3cm 之夾板，底板上面放置三支 6 吋 (15.24cm) 綑褶鋁薄管 (管壁厚僅 1.0 mm)，各長 7m，鋁管外壁髹以黑漆。面蓋為 1.5 mm 之透明塑膠布。太陽能收集器的一端裝有漏斗形管，管內有鼓風機乙

台，強制空氣流入鋁管。鼓風機具有風量調節裝置以控制進入鋁管之風量。

有關溫度與風速記錄之位置圖 1 上有標示。

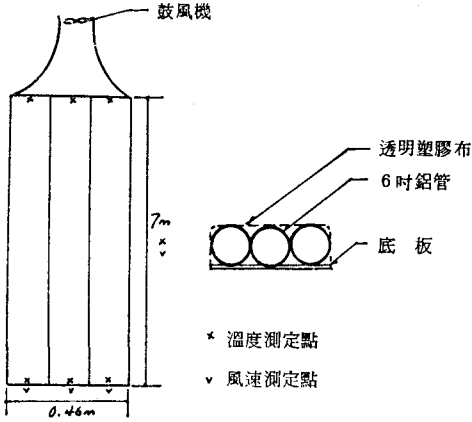


圖 1 鋁管式太陽能收集器示意圖

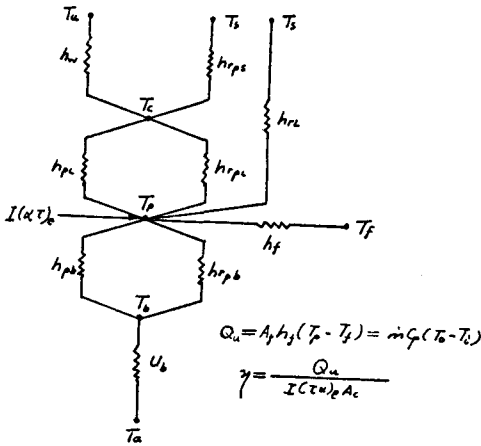


圖 2 熱流網路

(二) 模擬分析

鋁管式太陽能收集器之熱傳採用熱流網路模擬如圖 2 所示。

由熱流網路，已知 T_a 、 T_i 、 I ，以 C_p 及外界風速即可求得 T_c 、 T_p 、 T_r 、 T_b ，而後據以求出相應之太陽能收集器的集熱效率（以下簡稱熱效率）。

以上模擬分析所用的重要係數有管內空氣流與鋁管間的對流係數， h_r ，係依據 Petukhov 公式求得⁽⁴⁾：

$$\text{由 } Nu = \frac{R_o P_r}{X} \left(\frac{f}{8} \right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.11}$$

$$\left(X = 1.07 + 12.7 (P_r^{2/3} - 1) \left(\frac{f}{8} \right) \right)$$

$$\text{得 } h_r = \frac{k N_u}{D}$$

上式中， N_u 、 R_o 、 f 、 μ_b 、 μ_w 、 k 、 D 分別為紐賽特數、雷諾數、摩擦因數、管中空氣流之動力黏度、近管壁之空氣動力黏度、空氣導熱度、鋁管直徑。

面蓋與外界的对流係數，依據下式計算⁽⁵⁾：

$$h_w = \begin{cases} 5 & \text{當 } V = 0 \\ 2.8 + 3.0V & \text{當 } V > 0 \end{cases}$$

天空溫度 (T_s)，用下式估計⁽⁵⁾：

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5}$$

鋁管與面蓋間的对流係數以及鋁管與底板間的对流係數則以封閉空間的情況處理。

三、結果與討論

鋁管太陽能收集器裝設在臺大農機館屋頂平台上。七十六年元月間曾進行多次試驗，以了解鋁管內不同空氣流量／流速與熱效率的關係。茲選取管內空氣流量為 2.2 cmm、5.6 cmm，以及 9.0 cmm 時，其記錄所得之數據分別列於表 1、2 及 3。

由表 1，管內空氣流量為 2.2 cmm 相應之管內空氣流速為 0.68 m/s。當日外界風速介於 2~3 m/s。由當日上午 9:00 迄下午 3:30 共 14 個記錄，其平均熱效率為 26%，最小熱效率為 24%，最大熱效率為 27，相差小。中午時分之熱效率接近平均值。

由表 2，管內空氣流量為 5.6 cmm 相應之管內空氣流速為 1.71 m/s。當日外界風速介於 1~2 m/s。由當日上午 8:30，迄下午 4:00 共 16 個記錄，其平均熱效率為 38%。

由表 3，管內空氣流量為 9.0 cmm 相應管內空氣流速為 2.74 m/s。當日外界風速介於 1.5~3.5 m/s。由當日上午 9:00 迄下午 4:30 共 16 個記錄，其平均熱效率為 42%。多數個別記錄所得熱效率接近平均值。

將以上三種不同風量與相應之平均熱效率繪於圖 3。圖 3 雖只有 3 點，但已可顯示出熱效率與風量的變化情況。雖然它們的外界條件並不一致。

表1 太陽能強度、空氣溫度與熱效率／空氣流量 2.2cmm

時 間	T _a	T _i	T _o	Q _a	I	η
09:00	26	26.38	34.00	339.02	433.44	23.70
09:30	29	29.33	39.00	427.46	511.55	25.32
10:00	29	31.00	42.67	515.90	583.06	26.81
10:30	29	33.33	46.00	560.12	654.57	25.93
11:00	28	33.67	47.00	589.60	698.57	25.58
11:30	31	37.67	51.67	619.08	726.07	25.84
12:00	28	36.67	50.67	619.08	742.57	25.26
12:30	33	37.67	52.67	663.30	763.48	26.33
13:00	31	38.33	52.00	604.34	709.57	25.81
13:30	32	38.00	50.33	545.38	649.06	25.46
14:00	29	35.33	47.33	530.64	599.56	26.82
14:30	29	34.67	45.33	471.68	533.55	26.79
15:00	28	33.00	41.33	368.50	451.05	24.76
15:03	29	31.33	38.33	309.54	344.33	27.24

1.七十六年一月廿一日記錄。

2.外界風速 2~3 m/s。

表2 太陽能強度、空氣溫度與熱效率／空氣流量 5.6cmm

時 間	T _a	T _i	T _o	Q _a	I	η
08:30	16	21.67	24.00	257.95	273.93	28.54
09:00	18	23.33	27.00	405.35	368.54	33.33
09:30	18	24.00	28.33	479.05	397.14	36.55
10:00	18	25.67	31.00	589.60	464.25	38.49
10:30	19	29.00	35.67	737.00	539.05	41.43
11:00	20	30.33	37.67	810.70	583.06	42.13
11:30	21	31.00	39.67	958.10	616.06	47.13
12:00	23	31.67	38.33	737.00	517.05	43.19
12:30	23	32.67	38.33	626.45	539.05	35.22
13:00	23	31.67	37.67	663.30	497.25	40.42
13:30	24	32.33	38.33	663.30	491.75	40.87
14:00	25	33.00	37.67	515.90	429.04	36.44
14:30	25	33.33	38.00	515.90	440.04	35.53
15:00	26	31.67	36.67	55.275	418.04	40.07
15:30	26	31.33	34.00	294.80	286.03	31.23
16:00	25	28.33	30.67	257.95	204.62	38.20

1.七十六年一月廿三日記錄。

2.外界風速 1~2 m/s。

表 3 太陽能強度、空氣溫度與熱效率/空氣流量 9.0cmm

時 間	T_a	T_i	T_o	Q_a	I	η
09:00	23	24.33	27.33	530.64	393.84	40.83
09:30	24	25.67	29.67	707.52	473.05	45.32
10:00	24	28.00	32.33	766.48	572.06	40.60
10:30	27	31.00	36.00	884.40	628.16	42.66
11:00	31	33.33	38.67	943.36	673.27	42.46
11:30	24	35.00	40.67	1002.32	726.07	41.83
12:00	26	34.67	40.67	1061.28	742.57	43.31
12:30	26	35.67	42.33	1179.20	742.57	48.12
13:00	26	35.67	41.67	1061.28	720.57	44.63
13:30	23	30.33	36.33	1061.28	638.06	50.40
14:00	23	29.33	33.67	766.48	555.56	41.81
14:30	22	27.67	31.33	648.56	463.15	42.43
15:00	22	26.67	30.33	648.56	379.54	51.78
15:30	22	26.33	27.67	235.84	280.53	25.48
16:00	22	25.00	26.33	235.84	177.12	40.35
16:30	22	23.67	24.00	58.96	91.31	19.57

1.七十六年一月廿二日記錄。

2.外界風速 1.5~3.5 m/s。

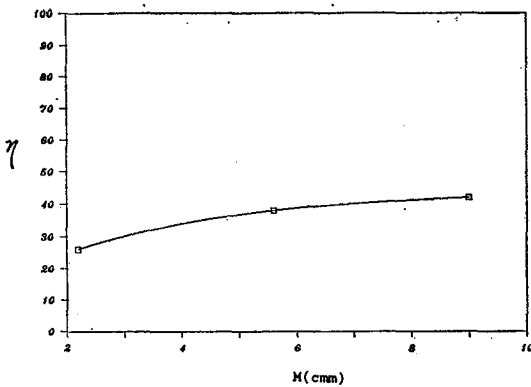


圖 3 管內空氣流量與熱效率之關係

有了以上 3 組數據，茲用以印證熱流網路程式，而後據以擴充與推演以進一步了解管內風速與熱效率之關係，以及鋁管直徑與熱效率之關係。

圖 4 為管內流量為 2.2cmm 時實測熱效率與熱流網路所得比較圖。圖 4 顯示實測值與預測值甚為接近，尤其是中午時分幾乎相等。上午早段時分以及下午晚段時分，兩者相異較大。這是由於該些

時間太陽斜射程度大，穿透面蓋距離較大，且又因斜射集熱面之吸收能力較弱，以致該些時分實際鋁管所吸收之太陽能量較輸入值為小，輸入值係假定陽光垂直穿過面蓋並垂直於集熱面。因之，該些時分熱流網路所得的預測值均略高於實測值。上述情況亦出現於圖 5 及圖 6。圖 5 及圖 6 分別為管內流量為 5.6 cmm 及 9.0 cmm 時熱效率之預測值與實測值之比較。

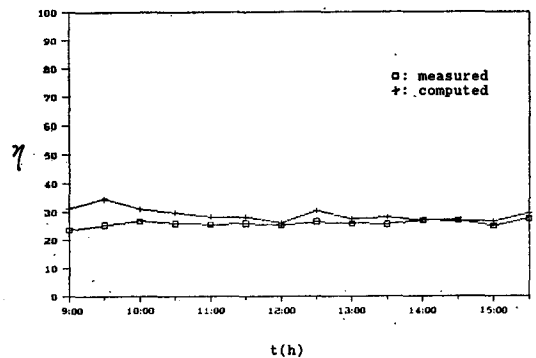


圖 4 管內空氣流量為 2.2 cmm 時實測與預測熱效率

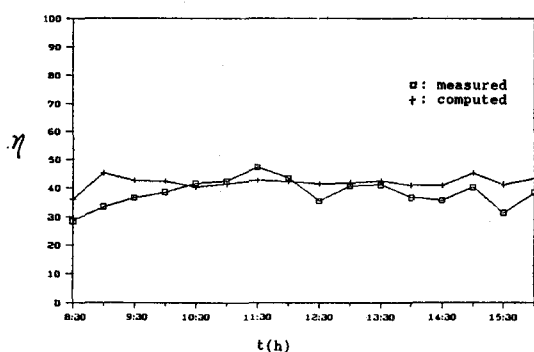


圖 5 管內空氣流量為 5.6 cmm 時實測與預測熱效率

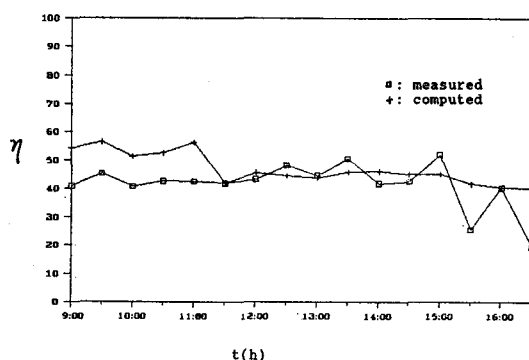


圖 6 管內空氣流量為 9.0 cmm 時實測與預測熱效率

率熱流網路輸入之太陽能量如作若干修正，可以減少上午早些時分以及下午晚段時分預測熱效率與實測值間的差異。然而，現有之程式已可相當準確預估鋁管式太陽能收集器中午時分之熱效率。中午時分之熱效率，一般均習用為該項太陽能裝置集熱效果優劣之判斷依據。因此，現有之熱流網路程式已足可應用於推論鋁管內不同風量／風速，或不同管徑對熱效率所造成之影響，作為鋁管式太陽能收集器設計之參考。

一般市面上可買到的綑褶鋁管，其直徑自 3 吋至 12 吋，其間相隔 1 吋，各種尺寸均有。惟以太陽能的利用而言，則以管徑 6 吋以上較佳，且筆者曾作計算，以目前價格而言，純以材料費估算，採用 6 吋與 9 吋鋁管，其單位集熱面積成本最低。

為探討牽涉設計鋁管式太陽能收集器最重要的二項問題，其一為管內空氣流速；其二為管徑。茲假設有二個鋁管式太陽能收集器，其集熱面積相同，均為 6.4 m^2 。其一為有 6 支各長 7 m 之 6 吋

鋁管，其二為有 3 支各長 7 m 之 12 吋鋁管。6 吋鋁管之 λ 與 D 之比為 0.033 (λ 為鋁管綑褶突起長度， D 為管徑)；而 12 吋鋁管其 λ 值與 6 吋管相同，因之 λ 與 D 之比為 0.016。

就上述二種情況，以熱流網路求其中午時分管內流速與熱效率之關係，以及管徑與熱效率之關係。凡管徑介於 6 吋至 12 吋之間者，其情況介於上述二者之間，自不待言。

茲分別討論管內流速與熱效率之關係，以及管徑與熱效率之關係如下：

(一)管內流速與熱效率

請參閱圖 7。由圖 7 顯示，6 吋鋁管之管內流速變化與熱效率關係曲線與 12 吋者相同。當管內流速由 1 m/s 漸次增大至 10 m/s。熱效率由 33% 上升至 59%。流速由 1 m/s 漸次增大至 5 m/s 階段，熱效率相應增加由快趨慢，是後流速再次增大，熱效率之增加，十分有限。約自 5 m/s 以後為求增加少許熱效率而需大為增加風機能源消耗，實屬不智。因此，圖 7 已明白說明適當的管內流速約在 5 m/s。

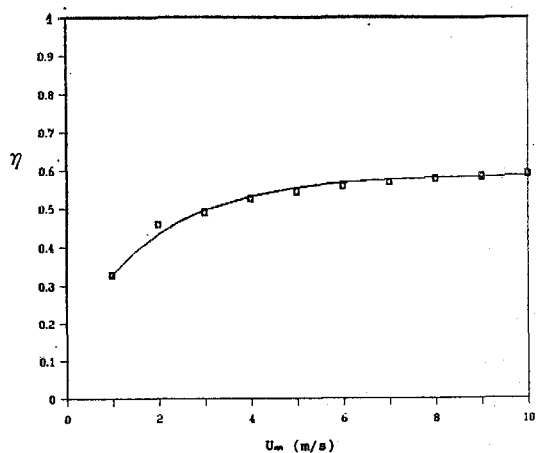


圖 7 管內空氣流速與熱效率之關係

(二)管徑與熱效率

請參閱圖 8。圖 8 顯示，相同之管內流量，6 吋管之熱效率均大於 12 吋管，但兩者之差值，隨流量增加而漸漸縮小。例如，管內流量為 6.6 cmm 時，6 吋管之熱效率為 33%，而 12 吋管之熱效率為 22%，兩者相差達 11%。但管流為 52.5 cmm 時，6 吋管之熱效率為 58%，而 12 吋管之熱效率則有 53%，相差 5%，顯然已減少。

四、結 論

綜上所述，欲使鋁管式太陽能收集器有合理之熱效率，顯然應採用直徑較小之鋁管，但必須兼顧管內空氣流速在 5m/s 左右。如管內流速超過 5m/s 甚多，則應取用直徑較大之鋁管，以降低管內流速，使達於最適設計流速。

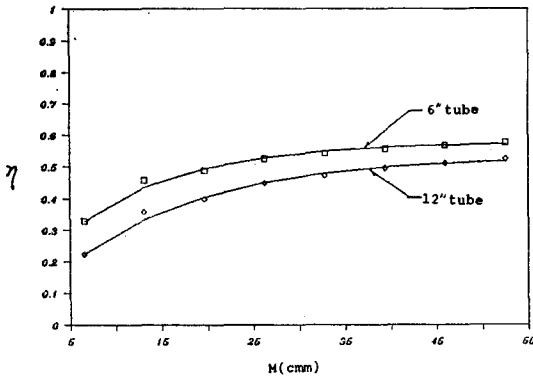


圖 8 不同管徑管內空氣流速與熱效率之關係

符 號 說 明

- T_a ：周圍大氣溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_s ：天空溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_c ：面蓋溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_p ：鋁管溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_b ：底板內側溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_f ：管內空氣流之平均溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_1 ：鋁管入口空氣溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。
 T_2 ：鋁管出口空氣溫度 ($T_2 = 2T_f - T_1$)， $^{\circ}\text{C}$ 。
 A_f ：鋁管內表面總面積， m^2 。
 A_c ：集熱面積， m^2 。
 $\dot{m}$ ：空氣質量流率， kg/s 。
 C_p ：空氣比熱， $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ 。
 h_w ：面蓋與外界風間之對流係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 $h_{r,s}$ ：面蓋與天空間的輻射熱傳係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 $h_{p,c}$ ：鋁管與面蓋間的對流係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 $h_{r,p,c}$ ：鋁管與面蓋間的輻射熱傳係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

- $h_{r,L}$ ：鋁管以長波向天空散失之熱傳係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 h_f ：管內空氣流與鋁管間之對流熱傳係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 $h_{r,p,b}$ ：鋁管與底板間的輻射熱傳係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 $h_{p,b}$ ：鋁管與底板間的對流係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 U_b ：底面熱散失係數， $\text{w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
 I ：日射量， w/m^2 。
 $(\tau\alpha)_0$ ：有效穿透率吸收率乘積。
 Q_u ：有用能量， w 。
 η ：太陽能收集器集熱效率， $\%$ 。
 U_m ：鋁管內空氣流速， m/s 。
 V ：外界空氣流速， m/s 。
 M ：鋁管內空氣流量， m^3/min 。
 t ：時間。

謝 啓

本研究試驗裝置之製作以及數據的蒐集多承本系賈精石先生，以及學生（現已畢業）賴威宏協助。文稿整理之際又承研究助理陳安哲君協助製作插圖，在此謹致謝忱。

參 考 文 獻

- 張漢聖 • 1988 • 鋼皮圓筒倉頂改成無蓋式太陽能空氣加熱器可行性之研究。中國農業工程學報，34(4)：1—4。
- 陳輝光 • 1988 • 圓筒倉頂鋁管太陽能收集器之性能分析。國立臺灣大學碩士論文。
- 張漢聖、蕭介宗 • 1987 • 鋼皮圓筒倉頂太陽能收集裝置之設計研究。中國農業工程學報，33(2)：40—44。
- Ozisik, M. N. 1985. Heat Transfer. McGraw-Hill Book Co., New York, U. S. A.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley Book Co., New York, U. S. A.

收稿日期：民國78年12月26日

接受日期：民國79年2月26日