

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽能聚光中溫熱管之開發

Development of solar concentrator medium temperature heat pipe

計畫編號：1032001INER014

受委託機關(構)：淡江大學

計畫主持人：康尚文

聯絡電話：02-26215656-3279

E-mail address：swkang@mail.tku.edu.tw

核研所聯絡人員：李恆毅

報告日期：103 年 11 月 28 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	10
一、中溫熱管製造	10
二、實驗平台架設	13
三、實驗方法與分析	14
(一) 中溫熱管水平傳熱測試結果	14
(二) 常溫熱管水平傳熱測試結果	15
(三) 太陽能碟式聚熱展示平台	19
參、主要發現與結論	20
肆、參考文獻	21

中文摘要

熱管在散熱傳導方面扮演著非常關鍵的角色，因此本研究開發中溫熱管的製造與應用技術，熱管為一封閉腔體，利用工作流體相變化來達到大量傳熱的目的，本研究採用無氧銅做為熱管殼體，外徑 8 mm，長 300 mm，厚度 0.3 mm，在其內壁燒結毛細結構，營造一毛細力將冷卻液體輸送回熱源端吸收熱量，考量殼體與毛細結構的附著力與相容性，採孔隙率 50 % 的銅粉燒結，厚度為 1.8 mm，本實驗規劃之工作流體為陶氏高溫導熱流體(Dowtherm-A)及去離子純水。實驗輸入不同的功率，對不同充填量的熱管，在操作溫度介於 200 – 500 °C 時，進行熱性能的評估與分析，實驗初步結果顯示，充填 1.90 克純水流體則展現小於 0.1 °C/W 的最佳的熱阻，但總傳熱量較低，耐受溫度有其極限，充填 3 克和 4 克 Dowtherm-A 流體之中溫熱管，傳遞熱量大，且熱阻皆低於銅棒，適合應用於太陽能碟式聚熱裝置。

Abstract

Heat pipes are the key technology to maximize the efficiency in a heat transfer system. The preliminary study in this paper is to develop and manufacture a medium temperature heat pipe. The experimental study will be conducted to investigate the thermal performance of the heat pipe when the operating temperatures are between 200-500°C. The container and the wick are made of copper and the working fluid is Dowtherm-A and water. The length of the heat pipe is about 300 mm. Preliminary experimental results show that 1.90 g of pure water filling ratio has the best thermal resistance of less than 0.1°C/W, but lower overall heat transfer capacity and temperature tolerance has its limits. Filling 3 g and 4 g of Dowtherm-A fluid, it is indicated that the high heat transfer rate medium temperature heat pipe which heat resistance are lower than copper, suitable for solar concentrating thermal devices application.

壹、計畫緣起與目的

熱管(Heat Pipe)在現今綠色節能、高效熱傳、廢熱回收與熱能管理等科技領域中所扮演的角色不容忽視，熱管經過不斷的研發與改良，不論在熱管的形狀、驅動方式、毛細結構到工作流體，產學界都有大量人力投入研究，熱管可被視為一種具有高熱傳導率之被動散熱元件，由於內部的二相流熱傳機制，使得熱管的傳熱能力是一般金屬的數百倍以上，一般來說可分為毛細熱管(Heat Pipe)如圖 1、震盪式熱管(Pulsating Heat Pipe)如圖 2、迴路式熱管(Loop Heat Pipe)如圖 3、虹吸式熱管(Closed Loop Two Phase Thermosyphon)如圖 4 及蒸汽腔體均溫板(Vapor Chamber)如圖 5 等。本研究自 2014 年起配合核能研究所物理組進行在太陽能取熱的中溫熱管應用開發工作。如表 1 所示中高溫熱管的作動環境約 200 到 1000 °C 之間，過去常用於核子動力熱電產生器(Nuclear-powered thermionic generators)或太空核子動力系統(Space reactor power system) [1]，然而隨著能源的多元化應用，高溫熱管的技術也應用在一些熱能動力系統，當作其熱源的接收器，快速的傳遞高溫熱能到引擎內部推動循環，如蒸汽引擎、史特林引擎(Stirling Engine)、布雷頓循環(Brayton Cycle)、朗肯循環(Rankine Cycle)等；在太陽能方面，則可作為高聚焦式太陽能擷取的有效工具；其他諸如高性能的高溫熱管熱交換器，超音速飛行器機翼前緣散熱，高溫廢熱回收、核能、熱電產生器、高溫鍋爐等

應用。常溫熱管相關技術在台灣已經非常成熟，並促使全球電子產業快速成長，現在變成電腦不可或缺的元件之一，在這樣的條件下，台灣應該更深入開發中高溫熱管與其相關製造技術，因應全球能源危機、能源裝置性能提升、降低耗能機構熱損與更有效的回收與廢熱再利用，透過核研所電漿薄膜聚光光熱電整合系統應用開發的需求，提出中溫熱管開發計畫，藉此建立台灣中高溫熱管的開發基礎，也期待引發台灣有更多的產業、學術界一起投入更多的研究，共同推動國家科技發展。

熱管在太陽能擷取系統扮演著非常關鍵的角色，其卓越性能可以將太陽能擷取的效益提升至最佳。但關鍵技術仍掌控在歐美的熱管製造商上。有鑑於此，本研究計畫研擬先期開發中溫熱管的製造與應用技術，參考文獻設計中溫熱管技術應用溫度大約在 550 到 750K 之間 [2]，這個溫度相當適合用於聚焦太陽熱能儲存系統。在選擇熱管的工作流體時，需要考慮最大熱傳量，熱傳量與毛細力與優點因子(Merit Number)有關，水的熱管優點因子最佳，物理特性如表 2 所示，是最好的工作流體。但由於臨界飽和蒸汽壓力的限制，工作溫度需低於 500 K，它並不適合用於中溫度範圍。在這個溫度範圍的流體只有很少的選擇，汞的操作溫度是可以被接受的，但因其毒性，基於安全理由而排除使用。某些合成油，如 Flutec PP2 和 PP9，和 Dowtherm-A，也是可採用的流體。PP2 和 PP9 的最高操

作溫度在 160 °C 和 225 °C 之間。陶氏導熱油(Dowtherm-A)如表 3、表 4 所示，是聯苯和二苯醚的低共熔混合物，可以操作在 150 至 400 °C 的範圍內(420~670 K)。

Park 等人在 2006 的研究報告中指出，從可使用的溫度範圍的觀點考慮，Dowtherm-A 是中溫的熱管最佳的工作流體 [3]。

2009 年 Lee 等人利用不銹鋼容器搭配內建的不鏽鋼網結構，並使用 Dowtherm-A 作為工作流體，成功在操作溫度 320 °C 下，透過實驗數據計算等效熱傳導係數高於 6000 W/m-K [4]。

2012 年 Park 等人進一步比較兩種不同的冷凝器對中溫熱管的散熱性能的影響。其中，中溫熱管是利用 SUS316 不銹鋼容器搭配 2 層疊合的 SUS304 不鏽鋼網(#40)作為其毛細結構，傳熱工作流體即為 Dowtherm-A，熱管的直徑和長度分別為 25.4 mm 和 1m。最大熱負荷為 1 kW 和熱管的工作溫度約為 270 °C，最高操作溫度為 322 °C，操作的熱通量大約在 60 – 70 kW/m² [5]。

本研究透過台灣優良的銅－水熱管製造技術，客製直徑 8 mm，長 300 mm，並以銅粉燒結(孔隙率 50%，厚度 1.8 mm)作為熱管內部之毛細結構，製造中溫銅－Dowtherm-A 熱管，並比較中溫熱管、銅－水熱管與銅棒之間熱性能的差異。

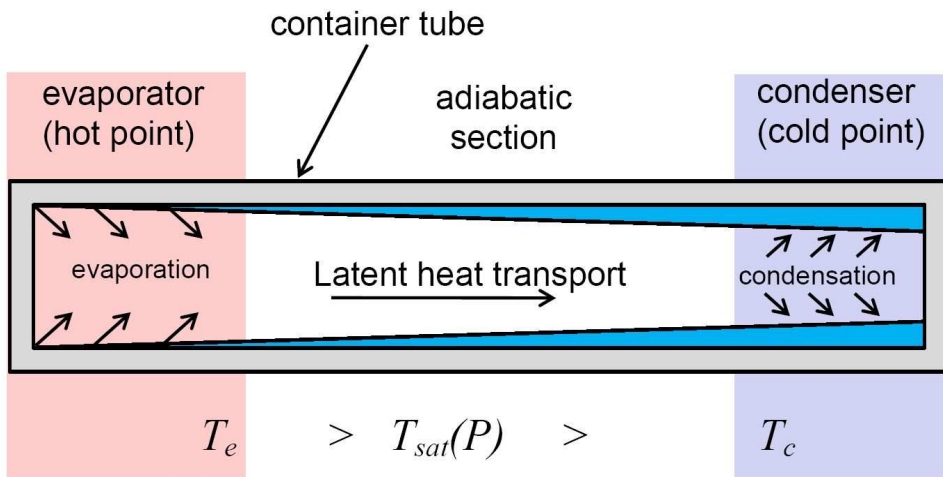


圖 1 毛細熱管示意圖

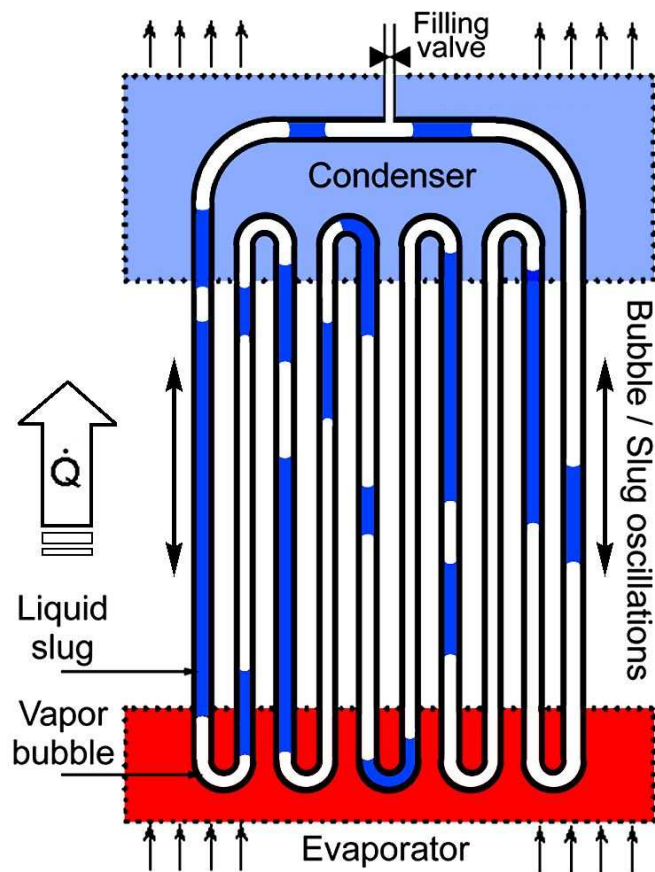


圖 2 震盪式熱管示意圖

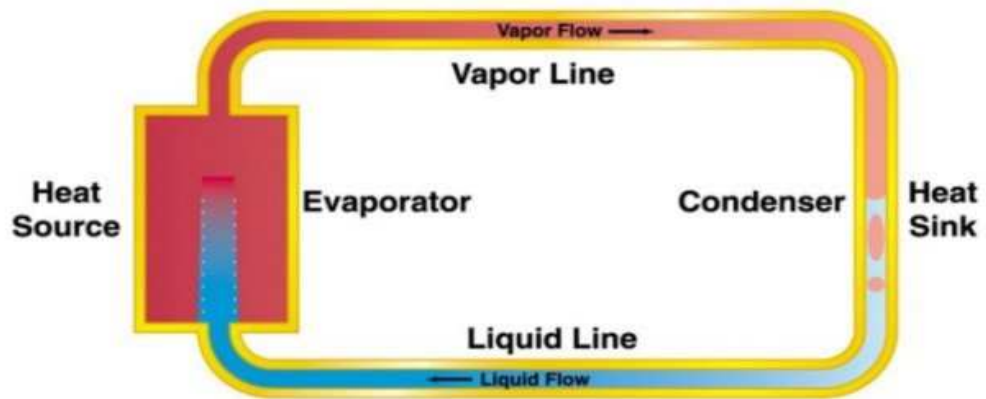


圖 3 迴路式熱管示意圖

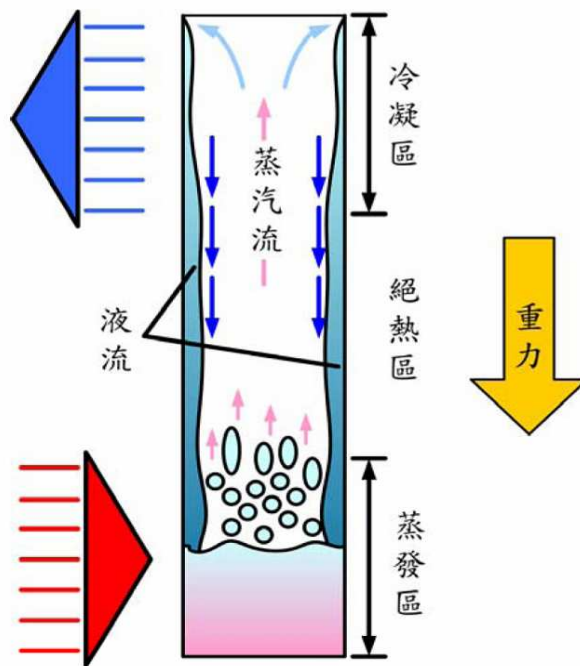


圖 4 虹吸式熱管示意圖

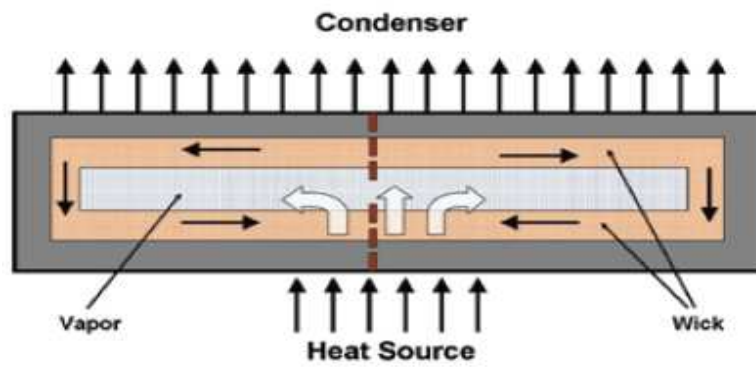


圖 5 蒸氣腔體均溫板示意圖

表 1 作動溫度與主要的作動流體

作動溫度(°C)	主要的作動流體
-273 ~ -70(極低溫)	氮、氫、氦、氖、甲烷
-70 ~ 200(低溫)	Freon、氮、丙酮、甲醇、乙醇、庚烷、純水
200 ~ 500(中溫)	萘、Dowtherm、thermex、硫、水銀
500 ~ 1000(高溫)	銫、銩、鉀、鈉
1000以上(極高溫)	鋰、鈣、鉛、銻、銀

表 2 水的典型特性

液體	密度		黏性係數		表面張力	
	溫度 (°C)	密度 (g/cm ³)	溫度 (°C)	黏性係數 η (Poise) *10 ⁻⁵	溫度 (°C)	表面張力 r (dyne/cm ²)
水	0	0.9999	0	1.783	0	75.64
	3.98	1.0000	10	1.302	10	74.22
	20	0.9982	20	1.002	20	72.75
	50	0.9881	50	0.548	50	67.91
	99	0.9591	100	0.281	100	58.85

表 3 DOWTHERM A 流體的典型特性

Typical Properties of DOWTHERM A Fluid [†]		
Composition: Diphenyl Oxide/Biphenyl Blend		
Color: Clear to Light Yellow		
Property	SI Units	English Units
Freeze Point	12.0°C	53.6°F
Atmospheric Boiling Point	257.1°C	494.8°F
Flash Point ¹	113°C	236°F
Fire Point ²	118°C	245°F
Autoignition Temperature ³	599°C	1110°F
Density @ 25°C (75°F)	1056 kg/m ³	66.0 lb/ft ³
Surface Tension in Air @		
20°C (68°F)	40.1 Dynes/cm	40.1 Dynes/cm
40°C (104°F)	37.6 Dynes/cm	37.6 Dynes/cm
60°C (140°F)	35.7 Dynes/cm	35.7 Dynes/cm
Estimated Critical Temperature	497°C	927°F
Estimated Critical Pressure	31.34 bar	30.93 atm
Estimated Critical Volume	3.17 l/kg	0.0508 ft ³ /lb
Average Molecular Weight		166.0
Heat of Combustion	36,053 kJ/kg	15,500 Btu/lb

表 4 DOWTHERM A 飽和液體特性

**Saturated Liquid Properties of
DOWTHERM A Fluid (SI units)**

Temp. °C	Vapor Pressure bar	Viscosity mPa sec	Specific Heat kJ/kg K	Thermal Cond. W/mK	Density kg/m ³
15	0.00	5.00	1.558	0.1395	1063.5
65	0.00	1.58	1.701	0.1315	1023.7
105	0.01	0.91	1.814	0.1251	990.7
155	0.06	0.56	1.954	0.1171	947.8
205	0.28	0.38	2.093	0.1091	902.5
255	0.97	0.27	2.231	0.1011	854.0
305	2.60	0.20	2.373	0.0931	801.3
355	5.80	0.16	2.527	0.0851	742.3
405	11.32	0.12	2.725	0.0771	672.5

貳、研究方法與過程

本研究開發可分為熱管製造、實驗平台架設、實驗方法與分析三大部分來描述。

一、中溫熱管製造

本研究之熱管製造程序與工法如下，成品如圖 6 所示：

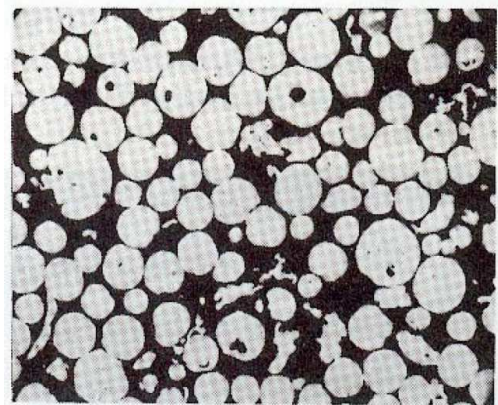
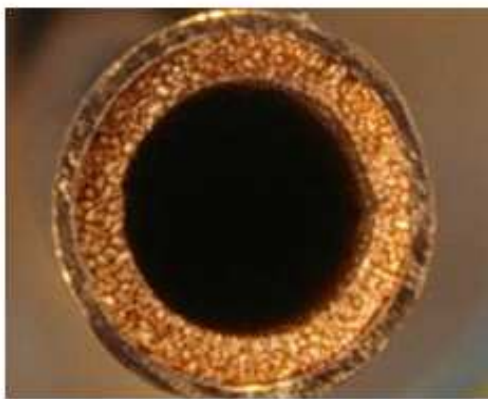
- (一) 將直徑 8 mm，長 300 mm，厚度 0.3mm 的薄殼無氧銅管體，一端以高速旋轉氬焊封口。
- (二) 將準備之燒結用銅粉粉末注入殼體如圖 7 (a)(b) 所示，中心以 3.8 mm 棒狀治具作為阻擋，燒結成形 0.3 mm 毛細結構與

蒸汽膨脹空間如圖 8 所示。

- (三)燒結完成後，另一端以擊徑機構將直徑 8 mm 敲擊縮口成直徑 4.2mm，以便於真空注入工作流體。
- (四)熱管填充過程，以毛細針頭通入蒸汽膨脹空間，注入所需之工作流體，以真空除氣法將非凝結性氣體逼除，再將 4.2mm 之頸口夾緊並切斷，在切斷處以氬焊將熱管封口如圖 9 所示。
- (五)製造過程熱管須維持一定的真空度，工作流體為水時，另須以加熱逼除方式將水中的氧氣逼除。



圖 6 不同充填量之銅-水與銅-Dowtherm-A 熱管成品一批



(a) 銅管燒結式毛細結構截面圖

(b) 燒結結構放大圖

圖 7 熱管燒結式毛細結構

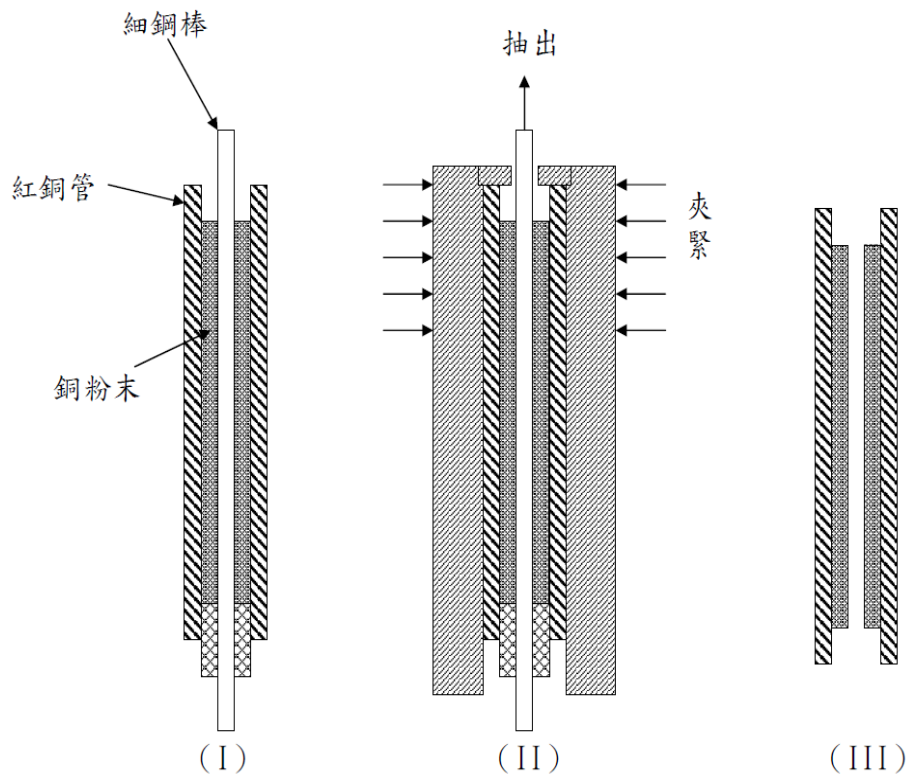


圖 8 燒結型熱管毛細構造製程

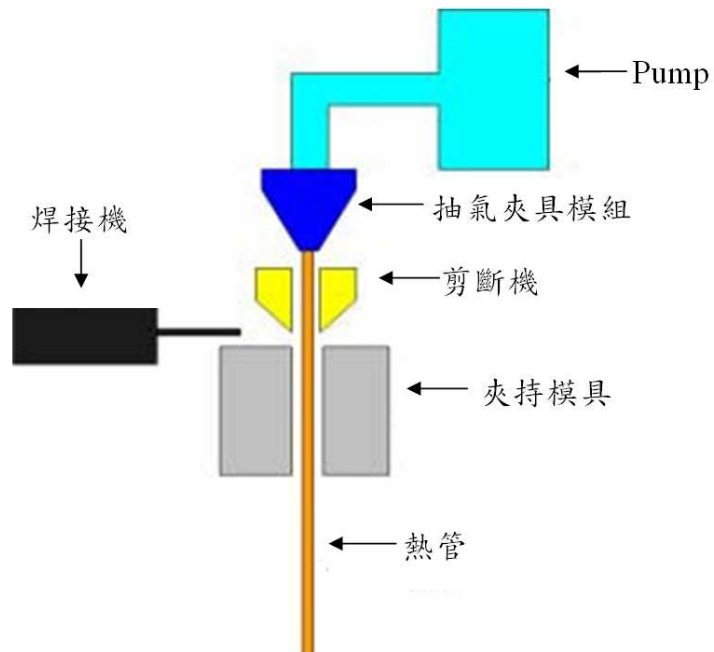


圖 9 流體脫氣封口示意圖

二、實驗平台架設

本研究將待測之中、低溫熱管放置於一可旋轉實驗平台，初步以水平方位測試，分為蒸發段、絕熱段及冷凝段，包含加熱台、冷凝座以及熱電偶，加熱器採用直徑為 7mm 之電熱棒，數量為 4 支，以並聯方式且固定瓦數對一銅塊施加熱量，蒸發段長度為 70 mm，冷凝段長度 60 mm；其溫度量測裝置為 K Type 熱電偶線，解析度為 $\pm 0.05\text{K}$ 。本研究之熱管末端，端點向內推算 15 mm 作為蒸發端與冷凝端之邊度量測基準點，熱管前後取 8 個溫度量測點如下圖 10 所示。

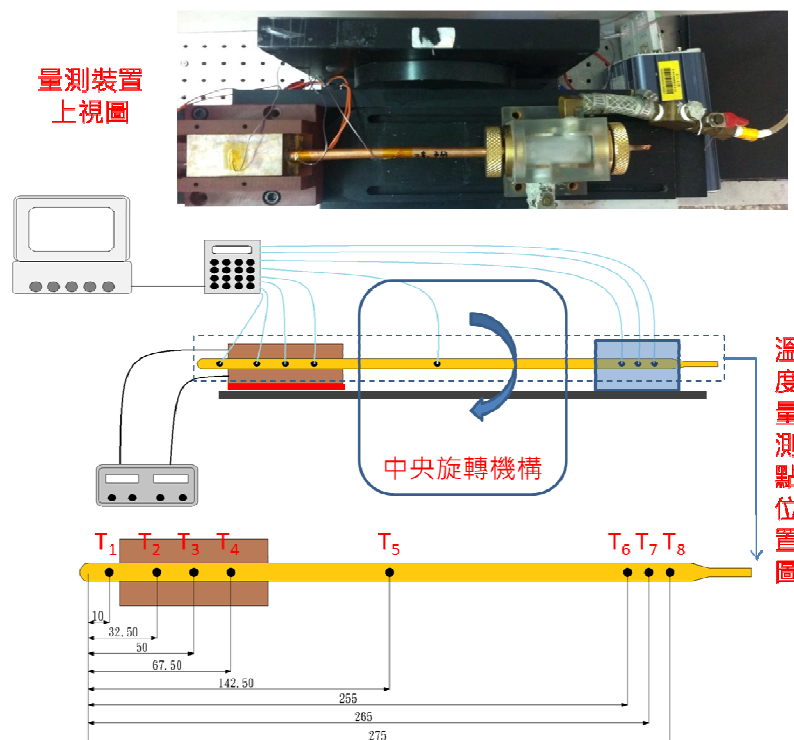


圖 10 熱管性能測試平台示意、裝置上視圖與實際量測位置圖

三、實驗方法與分析

實驗觀察溫度變化，並分析熱管在不同輸入功率下之熱阻變化情形，其中熱阻(Thermal Resistance)計算如公式(1)所示，

$$R_{hp} = \frac{\Delta T}{Q_{in}} = \frac{\frac{1}{3} \sum_2^4 T_i - \frac{1}{3} \sum_6^8 T_i}{Q_{in}} \quad (1)$$

實驗參數如下表 5 所示

表 5 實驗參數

工作流體	Dowtherm-A				水		
填充克數(克)	1	2	3	4	1.88	1.90	1.98
加熱瓦數(W)	20、40、60、80、100				10、15		

(一)中溫熱管水平傳熱測試結果

中溫熱管以充填 1g、2g、3g 與 4g 的 Dowtherm-A 流體以自然空冷條件，輸入 20W、40W、60W、80W 與 100W 的電功率進行測試，其中圖 11 顯示各瓦數穩態後蒸發端與冷凝端的平均溫度，蒸發端的平均溫度隨流體充填量增加而下降，顯示越多的流體可以吸收越多的蒸發熱，但在冷凝端卻以 3g 充填量表現出最高的溫度，與蒸發端平均溫度差距最小。圖 12 進一步計算熱阻，並與均質銅棒傳導作比較，銅棒熱阻變化較為穩定，熱阻隨熱通量增加自 2.0 °C/W 緩慢下降，最佳熱阻為 1.54 °C/W，發現充填 3g 與 4g 之中溫熱管熱阻均低於銅棒，本實驗測試之 8 mm 中溫熱管在充填 3g Dowtherm-A 流體時，

適用在蒸發段 $200 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $20 - 50\text{ kW/m}^2$ 如圖 13 所示，最低熱阻 $1.14\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，充填 4g Dowtherm-A 流體，在熱通量高於 54 kW/m^2 時，熱阻較 3g 充填量低，最佳蒸發段操作溫度於 $334\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，熱阻為 $1.10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，傳輸速度約為純銅的 2 倍。

(二)常溫熱管水平傳熱測試結果

如圖 14、15、16 所示，常溫熱管以充填 1.88g、1.90g 與 1.98g 的去離子超純水流體以自然空冷條件，輸入 10W、15W 的電功率進行測試，水每克所能吸收的相變的潛熱非常大，所以依造過去製造熱管的經驗，更進一步測試其最佳性能，作為高溫熱管性能逼近的目標。圖 17 顯示兩個不同瓦數經換算後，顯示固定單位熱通量下，蒸發端、冷凝端的平均溫度與熱阻隨流體充填量的變化狀態，越高熱通量熱阻值越低，其中在 1.90g 充填量下性能最佳、熱阻差距最小，熱通量於 5.7 kW/m^2 時，操作溫度在 $73.5 - 74.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之間，最佳熱阻為 $0.086\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ；熱通量於 8.5 kW/m^2 時，操作溫度在 $95 - 96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之間，最佳熱阻為 $0.079\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，傳輸速度約為純銅的 25 倍。

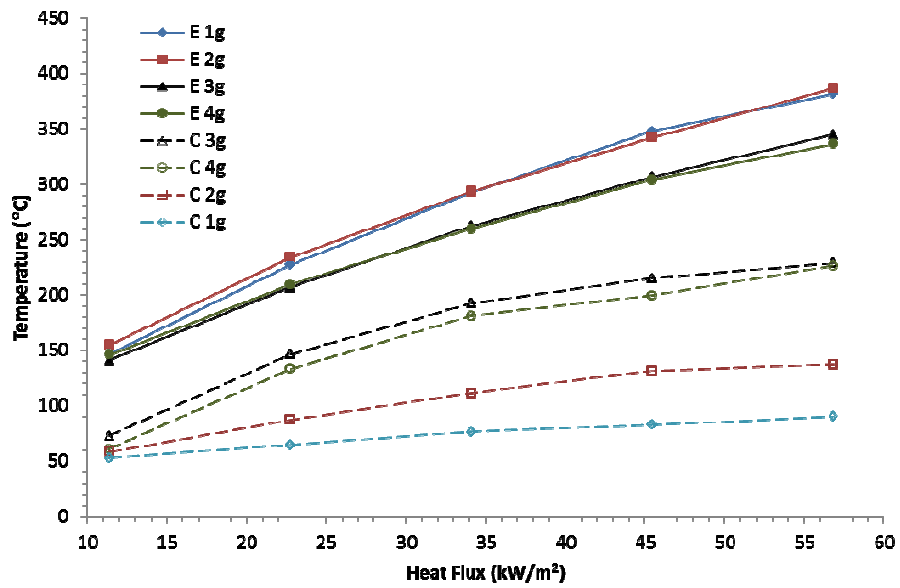


圖 11 中溫熱管於不同充填量下蒸發段與冷凝段平均溫度與熱通量之相對變化

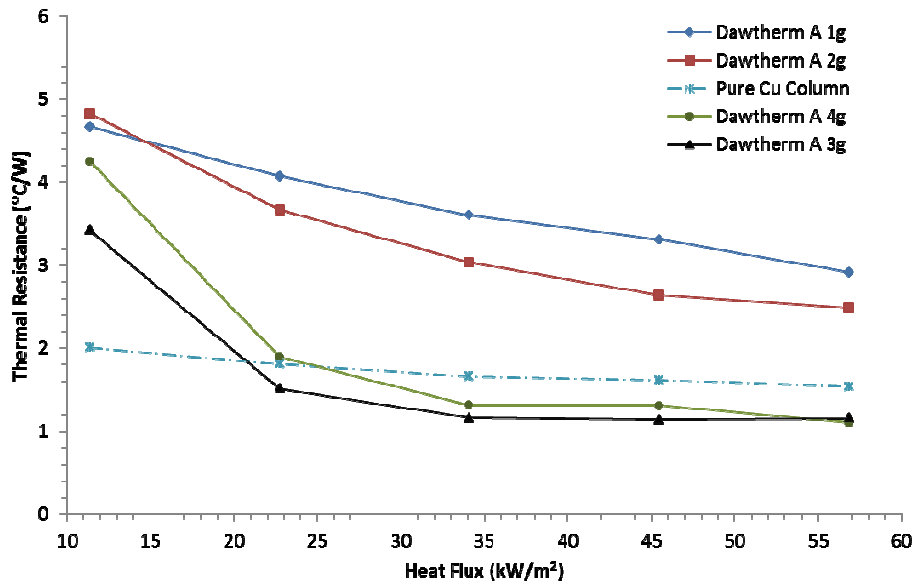


圖 12 中溫熱管於不同充填量下熱阻與熱通量之相對變化

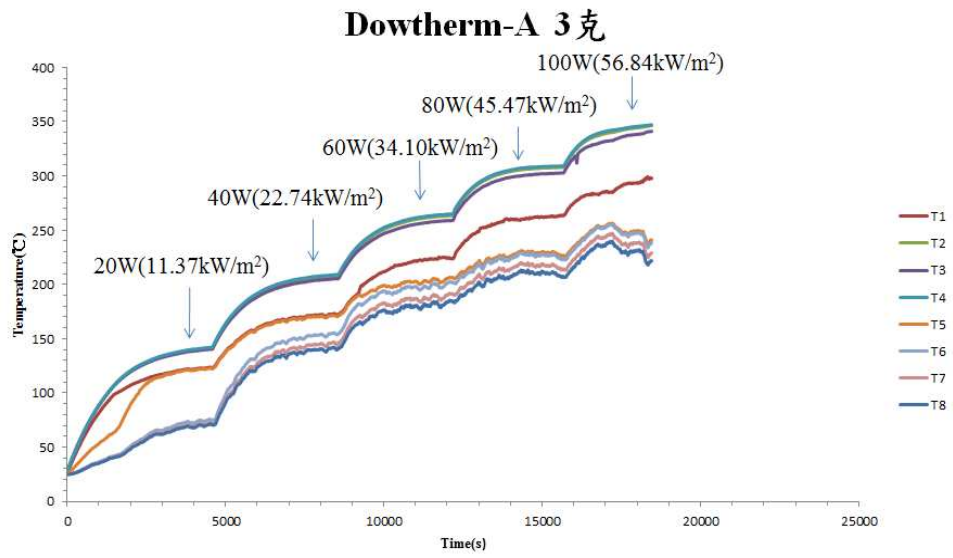


圖 13 中溫熱管溫度與時間關係圖

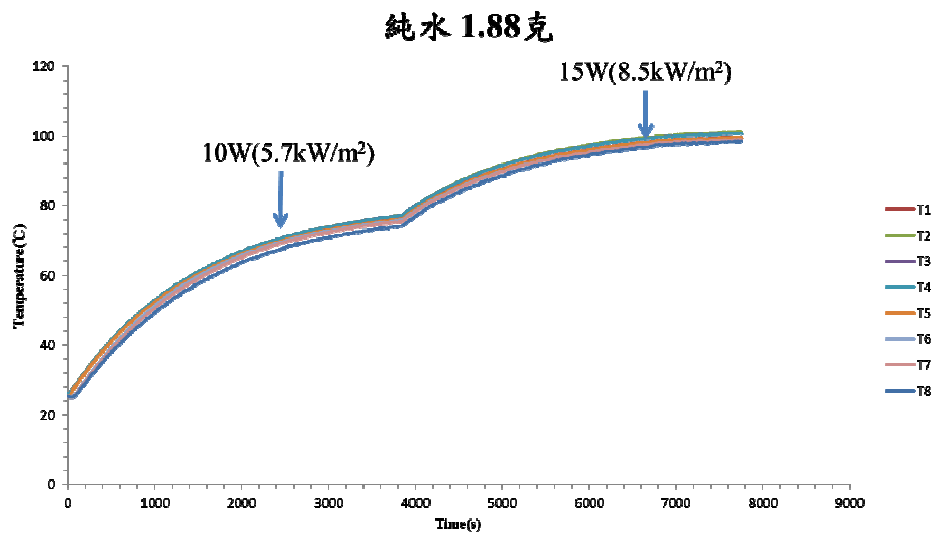


圖 14 常溫熱管 1.88 克溫度與時間關係圖

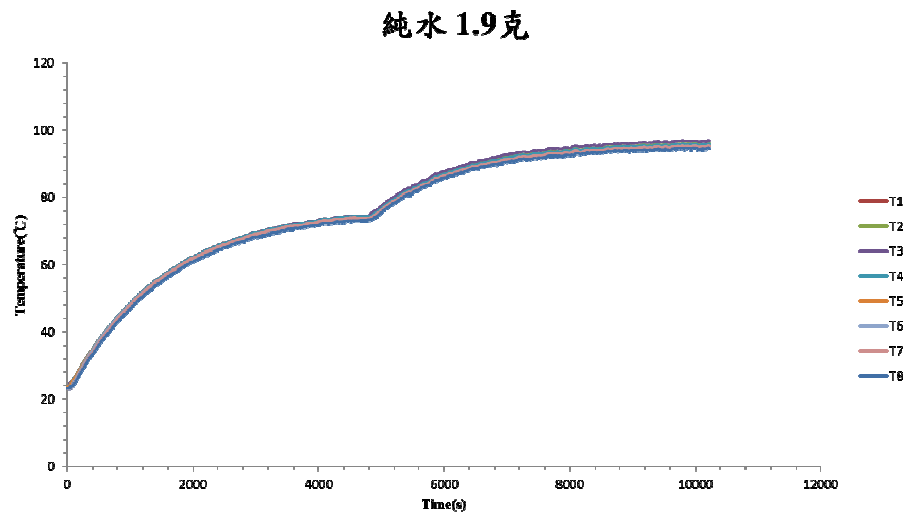


圖 15 常溫熱管 1.90 克溫度與時間關係圖

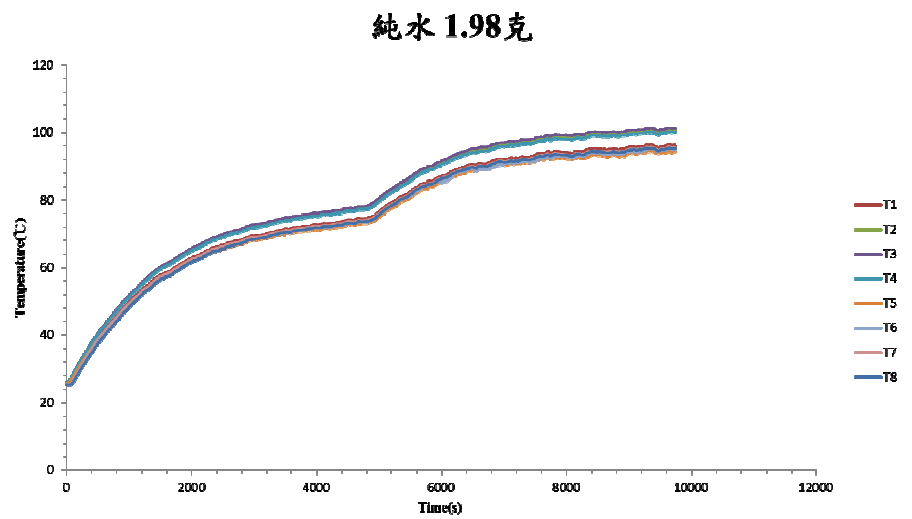


圖 16 常溫熱管 1.98 克溫度與時間關係圖

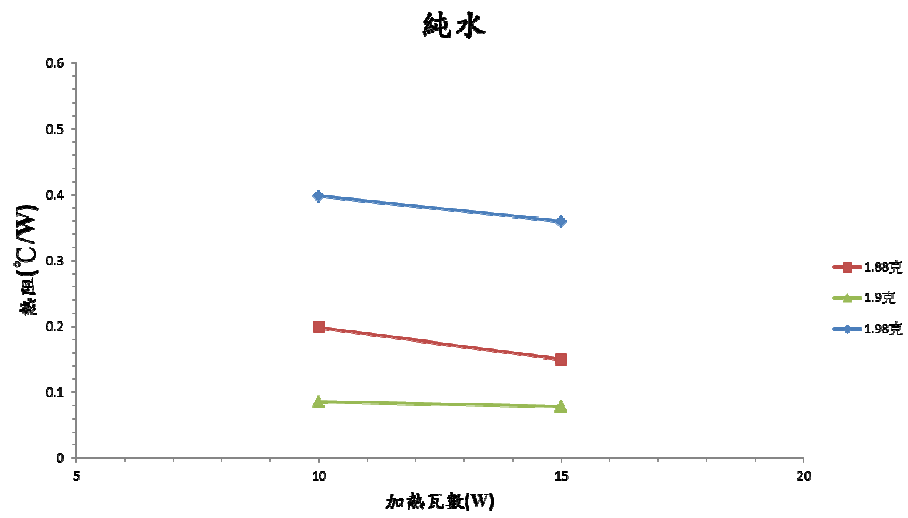


圖 17 常溫熱管在不同充填量之熱阻關係圖

(三) 太陽能碟式聚熱展示平台

實驗另完成小型太陽能碟式聚熱平台製造，並將中溫熱管實際架設於平台進行傳熱展示。

參、主要發現與結論

本研究成功利用 Dowtherm A 流體製造 300 mm 長之中溫熱管，同時製造高性能銅-水熱管與實心銅管，並進行性能測試與熱阻分析，實驗結果如下：

1. 實驗結果顯示中溫熱管熱阻在直徑 8mm，長 300 mm 傳輸距離下，導熱速度較等直徑銅管快 2 倍，最低熱阻為 $1.10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，操作溫度達 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高熱通量達 54 kW/m^2 ；常溫熱管則較等直徑銅管快 25 倍，最低熱阻為 $0.079\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 操作溫度低於 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高熱通量達 8.5 kW/m^2 。
2. 中溫熱管充填 3g Dowtherm-A 流體時，適用在蒸發段 $200 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $20 - 50\text{ kW/m}^2$ ，最低熱阻 $1.14\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，充填 4g Dowtherm-A 流體，在熱通量可高於 54 kW/m^2 ，最佳蒸發段操作溫度為 $334\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低熱阻 $1.10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 。
3. 常溫熱管充填 1.9 g 去離子純水流體時，熱通量 5.7 kW/m^2 ，操作溫度在 $73.5 - 74.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之間，最佳熱阻為 $0.086\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ；熱通量 8.5 kW/m^2 時，操作溫度在 $95 - 96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之間，最佳熱阻為 $0.079\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ，如圖 18 所示。
4. 熱管為中空金屬，重量將同體積純銅金屬輕得多，傳輸速度也較純銅快上許多，相對成本較銅金屬來的便宜。
5. 經初步測試後，Dowtherm-A 充填量為 3 克和 4 克之中溫熱管，有明顯的熱傳現象，因此可應用於小型太陽能碟式聚熱裝置，如圖 19 所示。

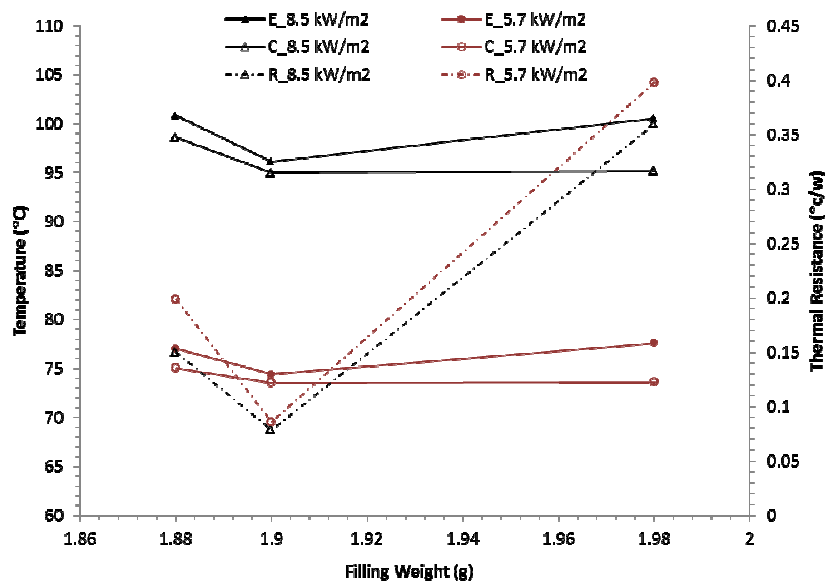


圖 18 常溫熱管於不同充填量下溫度、熱阻與熱通量之相對變化

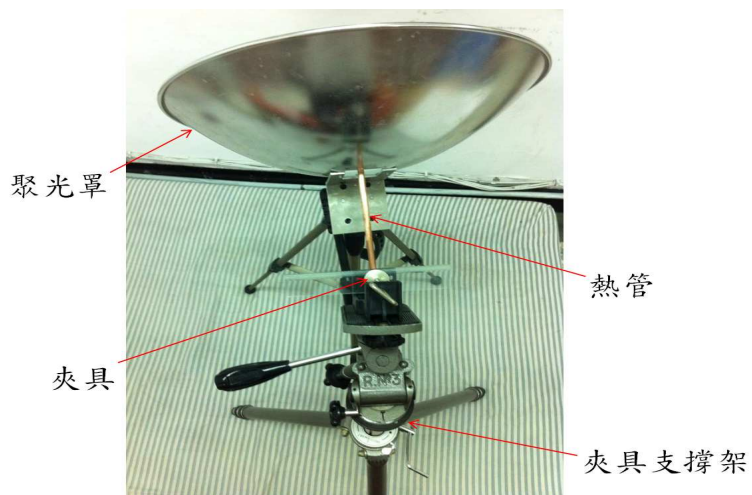


圖 19 小型太陽能碟式聚熱裝置

肆、參考文獻

1. David Reay, Ryan McGlen, Peter Kew, *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*, 6th Edition, Elsevier Science & Technology pp. 1 – 13, 2013.
2. Faghri, A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor and Francis, pp. 19 – 24, 1995.

3. Park, K. H., Lee, Y. S., Na, S. H., and Chang, K. C., "An Experimental Study on the Operating Characteristics of the Naphthalene and Dowtherm Heat Pipe," *Proc. of KSME Annual Meeting*, pp.1966 – 1971, 2006.
4. Lee, S. K., Kwak, H. H. Boo, J. H., Kim, J. K. and Kang, Y. H., "Thermal Performance of a Dowtherm-A Heat Pipe for the Thermal Storage System at Medium-high Temperature," *Proc. of Fall KSME Annual Conference*, pp.1645 – 1650, 2009.
5. Park, M. K., Boo, J. H., "Thermal Performance of a Heat Pipe with Two Dissimilar Condensers for a Medium-Temperature Thermal Storage System," *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 123 – 129, 2012.