

中溫熱虹吸管之實驗研究

呂承禹¹, 馬哈多¹, 康尚文¹

¹ 淡江大學機械與機電工程學系, 25137 Tel: +886-02-2621-5656#3281,

(E-mail : asdd434@gmail.com , imvkmahato@gmail.com , swkang3114@gmail.com)

摘要: 本中溫熱虹吸管研究動機為應用於商業工程設備的熱回收和節能, 熱管和熱虹吸管為傳熱系統效率最大化的關鍵技術, 本文初步是以水(三種不同填充比 18.5 %, 18.9 %和 19.5 %)和 Dowtherm-A (14.9 %和 15.5 %) 為熱虹吸管之工作流體。加熱功率由 160W 至 240W 進行測試, 本實驗所有的熱虹吸管的尺寸為長 915mm, 外徑 12.7mm 以及壁厚為 0.5mm。以實驗數據來估算熱阻與有效熱導率並進行比較形結果。測量 60 度傾角與 90 度傾角傾配置之溫度與時間變化, 觀察各特定條件下的啟動溫度。此外, 以實驗獲得的數據與由 Payakaruk 等人發展的數學關係式比較 90 度傾角下的最小熱阻。

關鍵字: 水 (Water); 道氏熱載體(Dowtherm-A); 熱虹吸管 (Thermosyphon); 熱阻 (Thermal Resistance)

1 前言

自從電子產品其外觀發展越來越小以來, 熱管理的挑戰一直在增加。多數已開發國家簽訂“京都議定書”後, 有效且經濟地回收廢熱能的方法需求逐漸上升[1]。現代電子系統需要除傳統散熱器之外的冷卻系統, 多年來熱管與熱虹吸管已被證明可以顯著提高傳熱。

熱管由真空密封容器, 毛細結構和工作流體組成, 而熱虹吸管僅由真空氣密組成。填充在熱管中的工作流體的量保持剛好足以使其內的毛細結構飽和。熱管工作原理為當熱管蒸發端受熱時, 其加熱能量會把管壁附近的工作流體汽化, 因此蒸發端的蒸汽壓力會升高, 使蒸汽往壓力較低的冷凝端流動而產生蒸汽流。蒸汽在冷凝端冷卻釋放潛熱而凝結成液體, 再由毛細結構的毛細作用力驅使液體回流到蒸發端來完成一個完整的循環。在此過程中無需外界提供動力給熱管來完成此一循環, 此為熱管的一大特性, 且因為藉由相變化之潛熱來完成熱量之傳遞, 故更能快速的輸送大量的熱量。中溫熱管的工作溫度在 450K 至 700K 的範圍內 [2]。在中溫熱管所考慮的主要工作流體是萘, 硫, 汞, Dowtherm-A 等。Dowtherm-A 可以在 15°C 到 400°C 之間作為工作流體使用, 因此 Dowtherm-A 作為各種熱管中的工作流體之熱性能操作條件[3][4]。

1.1 Dowtherm A 應用於中溫熱管文獻回顧

2012 年 M.K. Park 等人製作長度 1m, 外徑 25.4mm, 毛細結構為#40 兩層 SUS 304 不鏽鋼網, 充填 Dowtherm A 作為工作流體, 殼體為 SUS 316L 不鏽鋼的中溫熱管。實驗研究進行探討具有兩個不同

部分的冷凝器而受制於不同的邊界條件下熱管的散熱性能，第一個冷凝器是用環形散熱鰭片透過自然對流進行散熱，第二個冷凝器是利用冷卻流體作強制對流。實驗結果顯示在操作溫度 270°C 下熱傳導為商用銅的 22 倍，且燒乾現象只發生在環形散熱鰭片冷凝器，充填率為 372 % 和 66 kW/m^2 的熱通量下，直到到達最大熱通量 75 kW/m^2 ，其他較高充填率的熱管未觀察出燒乾現象，在兩個冷凝器作用下，燒乾現象發生在熱通量 $60\sim 70\text{ kW/m}^2$ ，如圖 1 所示。在環形散熱鰭片冷凝器作用下，熱阻隨著充填率上升而下降，儘管在兩個不同冷凝器下熱阻變化不明顯，但兩個冷凝器下較單一個冷凝器有卓越的熱傳導，在填充率 420% 顯示出最佳性能，如圖 2 所示[5]。

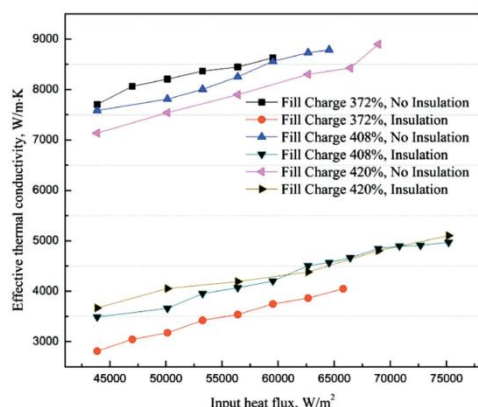


圖 1 有效熱傳導係數和熱通量之關係圖
(在冷卻水溫度為 80°C 下)

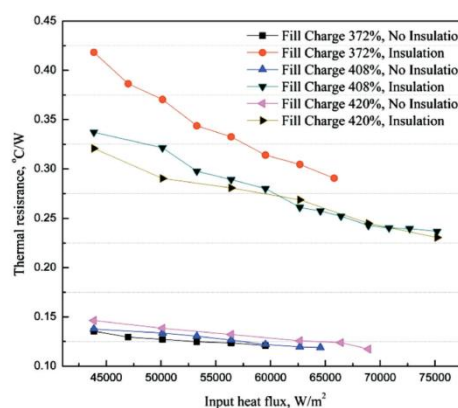


圖 2 熱阻和熱通量與充填率之關係圖
(在冷卻水溫度為 80°C 下)

2 實驗方法

實驗方法介紹了實驗原理圖，熱虹吸測量點和測試的主要過程。沿熱虹吸裝置安裝了 12 個 K 型熱電偶，並設置了溫度分佈。

2.1 實驗架設

實驗裝置如圖 3 所示，該裝置主要由兩相閉合熱虹吸管，電加熱器，液體冷卻迴路，電腦和用於捕獲數據的所需儀器（數據記錄器）組成。該設置牢固地固定在框架上，以在垂直方向上測試熱虹吸管。

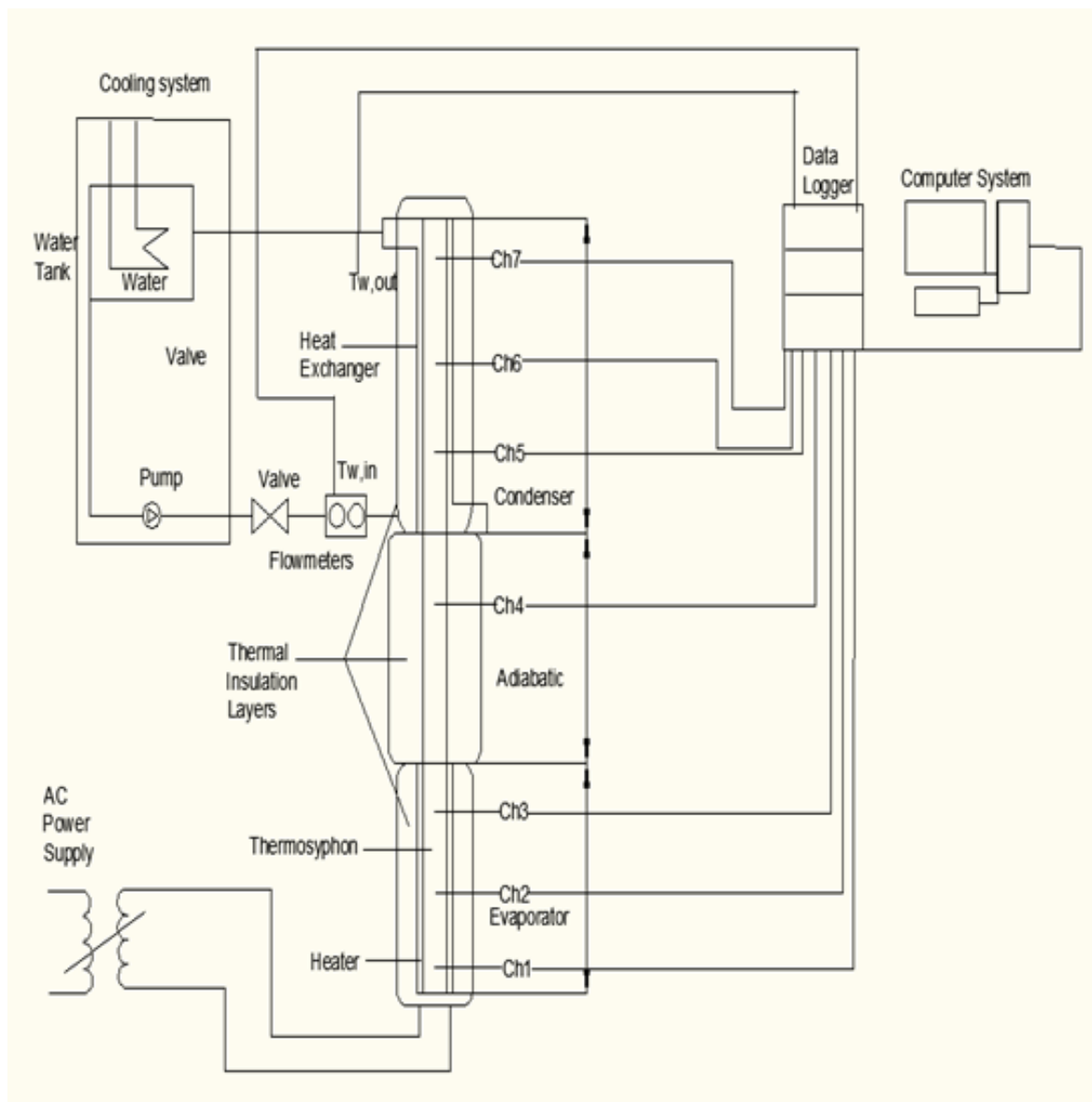


圖 3 實驗示意圖

2.2 熱虹吸管尺寸和熱電偶位置

製造了五個熱虹吸管，外徑為 12.7mm，長度為 915mm 的光滑不銹鋼管，壁厚為 0.5mm，內徑為 11.7mm。它包含 200mm 長的蒸發器部分，515mm 長的絕熱部分和 200mm 長的冷凝器部分。熱電虹膜上的熱電偶的尺寸位置如圖 4 所示。

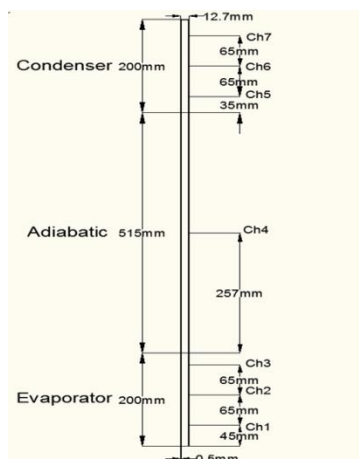


圖 4 具有熱電偶位置的熱虹吸管示意圖

觀察了沿熱虹吸表面的溫度分佈，採用 9 個熱電偶。如圖 4 所示，三個熱電偶標記為 Ch1，Ch2 和 Ch3，用於監測蒸發器部分，並從底部放置 45mm，110mm 和 175mm。標有 Ch4 的另外三個熱電偶位於距離絕熱部分底部 457mm 處，而冷凝器部分使用三個熱電偶進行監測，這些熱電偶距離底部為 750mm，815mm 和 880mm，熱電偶被標記為 Ch5，Ch6 和 Ch7 在這些職位。這三個熱電偶也用於確認在整個進行的測試中熱管內不存在不可冷凝氣體（NCG）。NCG 的存在將阻塞在冷凝器部分的頂部區域處的一部分，這是因為 NCG 被蒸氣掃過冷凝器部分的頂部區域。在這種情況下，有效的冷凝器長度將減小，因此熱阻將增加。還使用兩個額外的熱電偶觀察來自冷凝器的熱交換器的入口和出口水溫，標記為 $T_{w, in}$ 和 $T_{w, out}$ 。這兩個熱電偶的位置和裝配完整。使用一個熱電偶來測量加熱器的溫度，它與加熱器的表面一致。用於實驗的熱電偶是 K 型（NiCr / NiAl）。數據掃描系統採用 8 個溫度測量通道，用於讀取和監控連接到 PC 的熱電偶，以 1Hz 掃描頻率進行實時數據記錄。使用流量計來測量冷卻水流量。

2.3 實驗程序

在開始實驗工作之前，將入口水的水流量和溫度固定為所需值，並設定所需的功率輸入。設備需要 25-30 分鐘才能達到穩定狀態，使內部能量不再發生變化。絕熱部分保溫絕緣，確保不會與環境交換熱能。一旦確保絕熱壁溫度以及蒸發器溫度恆定，則假設在蒸發器部分的熱量和冷凝器部分中的熱量之間存在平衡。在這種情況下，熱管達到穩定狀態，絕熱壁溫度在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 的溫度範圍內變得均勻。然後使用連接到計算機系統的數據記錄器在加熱器打開幾秒鐘之後監測來自所有熱電偶的溫度讀數。對於 50W 至 380W 之間的各種電力輸入重複該過程。為了確認重複性，對於每個功率吞吐量，每次測試重複三到四次。在覆蓋整個功率範圍之後，進行了重複測試，以確定長時間操作時間後熱虹吸管的穩定熱特性。通過每次熱虹吸達到平衡時增加功率，最終達到不能達到平衡的狀態，從而隨著絕熱和冷凝器溫度開始時蒸發器中的溫度連續上升，進行每個水熱虹吸管的熱容量試驗下降。最初進行啟動實驗，

其中在整個實驗過程中保持輸入功率相同的情況下達到穩定狀態。觀察水和 Dowtherm-A 熱虹吸管作為典型的穩態實驗，通過調整電壓和電流，使功率保持恆定。將恆定功率供給加熱器以加熱蒸發器。通過流量計調節水流量，以保證質量流量在整個實驗過程中保持不變。啟動期間的溫度變化很小是由於人為錯誤。

2.4 實驗熱虹吸管之規格

表 1 水熱虹吸管之規格表

工作流體	水(填充率 18.5 %)	水(填充率 18.9 %)	水(填充率 19.5 %)
長度	915 mm	915 mm	915 mm
外徑	12.7mm	12.7mm	12.7mm
內徑	11.7mm	11.7mm	11.7mm
管壁厚度	0.5mm	0.5mm	0.5mm
蒸發段部分	200mm	200mm	200mm
絕熱端部分	515mm	515mm	515mm
冷凝端部分	200mm	200mm	200mm
管內液柱高度	169.27mm	172.93mm	178.42mm
管材	不鏽鋼(304)	不鏽鋼(304)	不鏽鋼(304)

表 2 Dowtherm-A 熱虹吸管之規格表

工作流體	Dowtherm-A(填充率 14.9 %)	Dowtherm-A(填充率 15.5 %)
長度	915 mm	915 mm
外徑	12.7mm	12.7mm
內徑	11.7mm	11.7mm
管壁厚度	0.5mm	0.5mm
蒸發段部分	200mm	200mm
絕熱端部分	515mm	515mm
冷凝端部分	200mm	200mm
管內液柱高度	136.33mm	141.82mm
管材	不鏽鋼(304)	不鏽鋼(304)

2.5 實驗分析

熱虹吸管的有效整體熱阻是應用類似電學公式來確定的[6]:

$$R_{th} = \frac{\Delta(T_{e,av}) - (T_{c,av})}{Q_e} \quad (1)$$

其中

$$T_{e,av} = \frac{(T1 + T2 + T3)}{3}, T_{c,av} = \frac{(T5 + T6 + T7)}{3}, Q_e = V_{volt} * I_{ampere} \quad (2)$$

使用以下公式計算從冷凝端部分去除熱量。

$$Q_c = m_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3)$$

運用公式尋找有效熱傳導係數如下式所示

$$K_{th-eff} = \frac{L_{th}}{A_{th} \cdot R_{th}} \quad (4)$$

2.5.1 最小熱阻的關係式[7]

$$\frac{R_m}{R_{90}} = 0.647 Ku^{0.0297} \quad (5)$$

$$Ku = \frac{Q}{\frac{L \rho_v [\sigma_l g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25}}{\rho_v^2}} \quad (6)$$

3 結果與討論

五支熱虹吸管上使用兩種工作流體，以水和 Dowtherm-A 進行填充。三支熱虹吸管由三種不同填充比（18.5 %，18.9 %和 19.5 %）的水填充，其餘兩支熱虹吸管也以不同的填充比例（14.9 %和 15.5 %）使用 Dowtherm-A 填充。水熱虹吸管以三種功率加熱（即 160W，200W 和 240W）進行測試，而含有 Dowtherm-A 的熱虹吸管僅在垂直擺放下進行測試，並以三種功率加熱(160W，200W 和 210W)。在下圖的曲線中可以觀察到水熱虹吸管的啟動溫度。

3.1 填充率 18.5 % 水熱虹吸管之測試結果

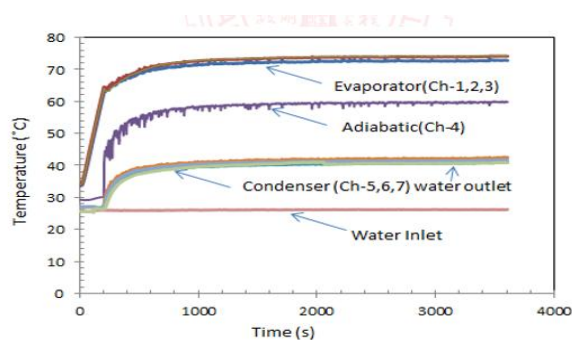


圖 5 溫度與時間關係圖 (160W 90° 填充率 18.5 %)

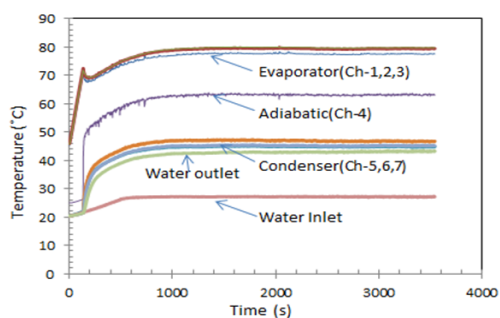


圖 6 溫度與時間關係圖 (200W 90° 填充率 18.5 %)

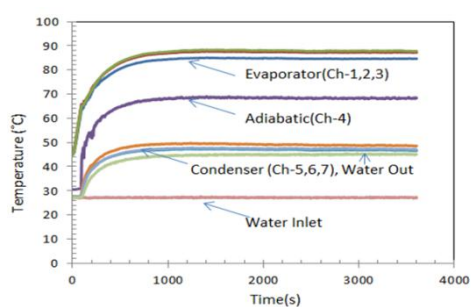


圖 7 溫度與時間關係圖 (240W 90° 填充率 18.5 %)

圖 5 至圖 7 是 18.5 % 水熱虹吸管的實驗結果。測試時間為一小時。每組實驗的啟動溫度可以在曲線中觀察到。在 160 W 加熱功率中，啟動溫度位於 65°C 至 67°C 之間；在 200 W 加熱功率中，啟動溫度位於 60°C 至 68°C 之間；在 240 W 加熱功率中，啟動溫度位於 63°C 至 65°C 之間。以 18.5 % 填充率的水熱虹吸管進行重複測試中，可觀察到啟動溫度主要在 63°C 至 67°C 之間。

3.2 填充率 18.5 % 水熱虹吸管測試結果

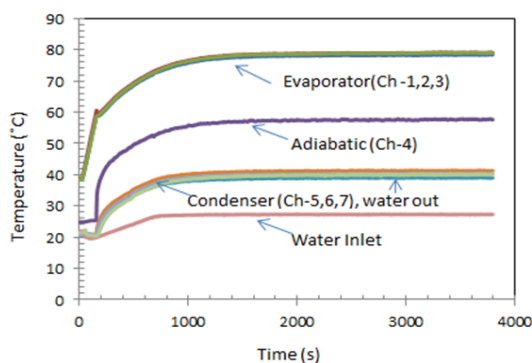


圖 8 溫度與時間關係圖 (160W 90° 填充率 18.9 %)

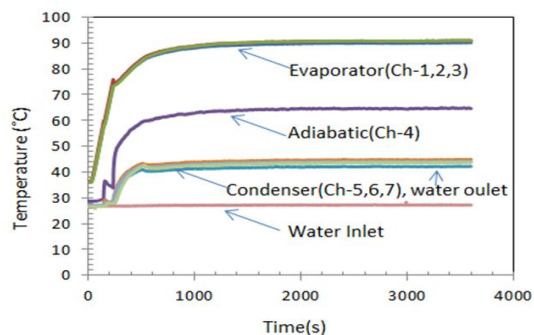


圖 9 溫度與時間關係圖 (200W 90° 填充率 18.9 %)

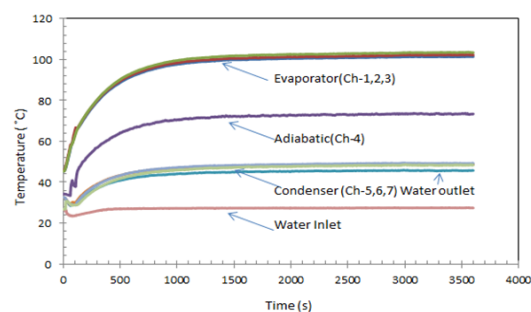


圖 10 溫度與時間關係圖 (240W 90° 填充率 18.9 %)

圖 8 至圖 10 是 18.9 % 水熱虹吸管的實驗結果。測試時間為一小時。每組實驗的啟動溫度可以在曲線中觀察到。在 160 W 加熱功率中，啟動溫度位於 61°C 至 65°C 之間；在 200 W 加熱功率中，啟動溫度位於 60°C 至 63°C 之間；在 240 W 加熱功率中，啟動溫度位於 60°C 至 63°C 之間。以 18.5 % 填充率的水熱虹吸管進行重複測試中，可觀察到啟動溫度主要在 63°C 至 67°C 之間。

3.3 填充率 19.5 % 水熱虹吸管測試結果

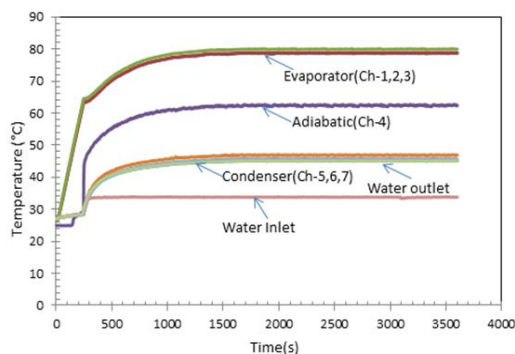


圖 11 溫度與時間關係圖 (160W 90° 填充率 18.9 %)

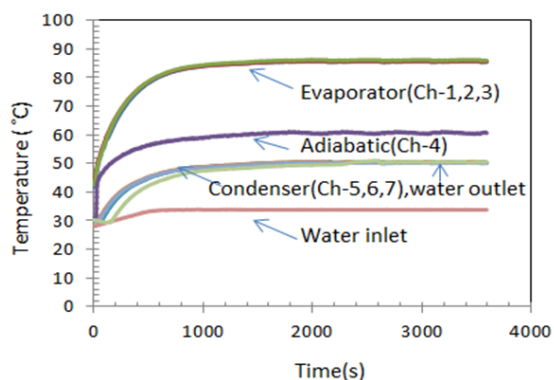


圖 12 溫度與時間關係圖 (200W 90° 填充率 18.9 %)

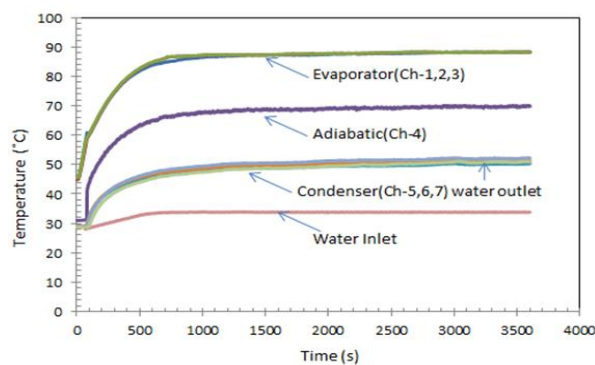


圖 13 溫度與時間關係圖 (240W 90° 填充率 18.9 %)

圖 11 至圖 13 是 19.5 % 水熱虹吸管的實驗結果。測試時間為一小時。每組實驗的啟動溫度可以在曲線中觀察到。在 160W 加熱功率中，啟動溫度位於 58°C 至 63°C 之間；在 200W 加熱功率中，啟動溫度位於 58°C 至 63°C 之間；在 240W 加熱功率中，啟動溫度位於 60°C 至 63°C 之間。以 18.5 % 填充率的水熱虹吸管進行重複測試中，可觀察到啟動溫度主要在 58°C 至 63°C 之間。

3.4 填充率 14.9 % Dowtherm-A 熱虹吸管測試結果

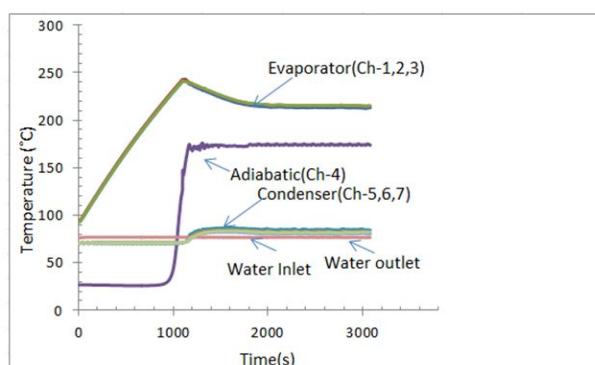


圖 14 溫度與時間關係圖 (160W 90° 填充率 14.9 %)

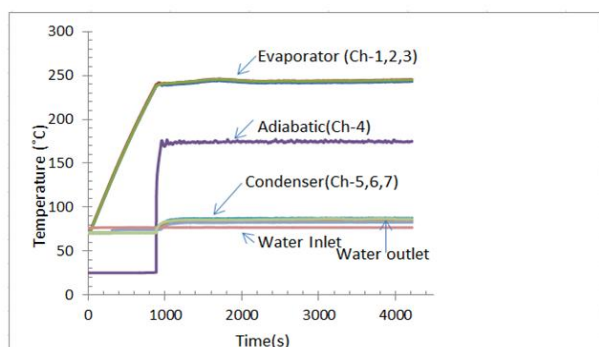


圖 15 溫度與時間關係圖 (200W 90° 填充率 14.9 %)

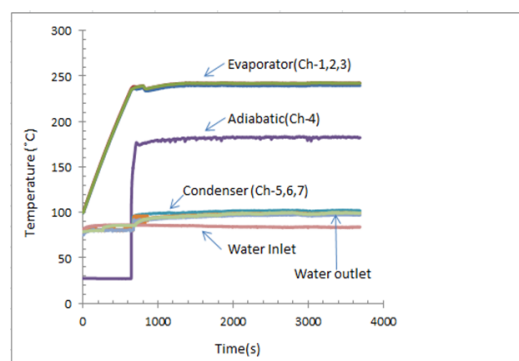


圖 16 溫度與時間關係圖 (210W 90° 填充率 14.9 %)

圖 14 至圖 16 是填充率 14.9 % 之 Dowtherm-A 熱虹吸管的實驗結果。測試時間為一小時。每組實驗的啟動溫度可以在曲線中觀察到。在 160 W 加熱功率中，啟動溫度位於 235°C 至 238°C 之間；在 200 W 加熱功率中，啟動溫度位於 238°C 左右；在 210 W 加熱功率中，啟動溫度位於 234°C 至 236°C 之間。以填充率 14.9 % 的 Dowtherm-A 熱虹吸管進行重複測試中，可觀察到啟動溫度主要在 235°C 至 238°C 之間。

3.5 填充率 15.5 % Dowtherm-A 熱虹吸管測試結果

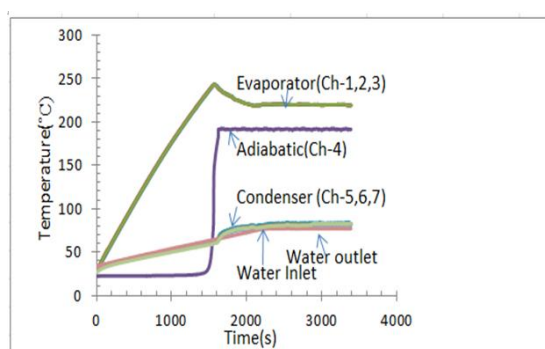


圖 17 溫度與時間關係圖 (160W 90° 填充率 15.5 %)

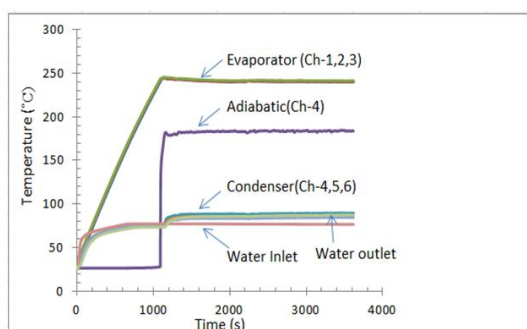


圖 18 溫度與時間關係圖 (200W 90° 填充率 15.5 %)

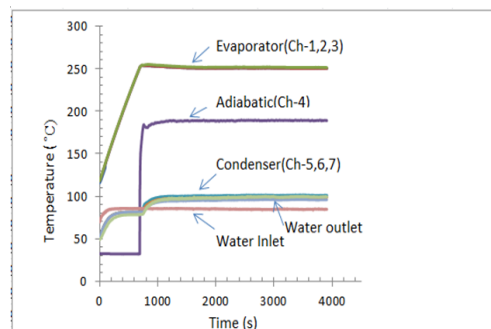


圖 19 溫度與時間關係圖 (240W 90° 填充率 15.5 %)

圖 17 至圖 19 是填充率 15.5 %之 Dowtherm-A 熱虹吸管的實驗結果。測試時間為一小時。每組實驗的啟動溫度可以在曲線中觀察到。在 160 W 加熱功率中，啟動溫度位於 237°C 至 238°C 之間；在 200 W 加熱功率中，啟動溫度位於 240°C 至 241°C 之間；在 210 W 加熱功率中，啟動溫度位於 251°C 至 252°C 之間。以填充率 15.5 %的 Dowtherm-A 熱虹吸管進行重複測試中，可觀察到啟動溫度主要在 237°C 至 252°C 之間。

3.6 水熱虹吸管熱阻與輸入熱通量

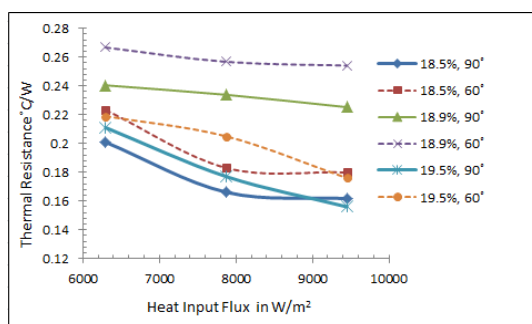


圖 20 熱阻與輸入熱通量的比較

圖 20 顯示出了不同輸入熱通量相對於熱阻的變化。可清楚地觀察到，對於不同的熱虹吸管，輸入熱通量增加，熱阻會相對應降低。在所有實驗中，可觀察到在特定功率輸入垂直擺放之熱阻會小於 60 度的傾角，因為在冷凝端冷凝後的液體可更快地返回到蒸發端。

3.7 水熱虹吸管有效熱傳導係數與輸入熱通量

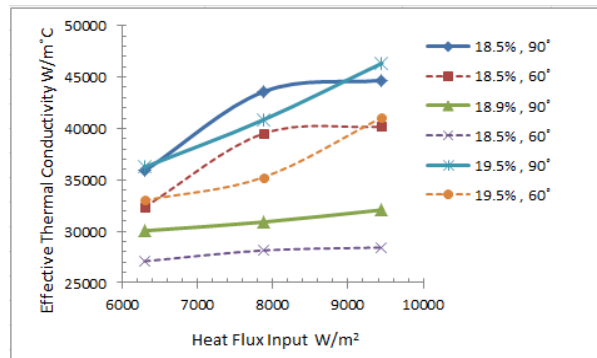


圖 21 有效熱傳導係數與輸入熱通量的比較

圖 21 顯示出了相對於輸入熱通量的有效熱導率的變化。可觀察到對於不同的熱虹吸管，由於輸入熱通量增加，有效熱導率也相對應增加。在實驗中所有情況下使用的熱虹吸管，在特定功率輸入下 90 度傾角下的有效熱導率會大於 60 度傾角。

3.8 實驗熱阻與相關熱阻

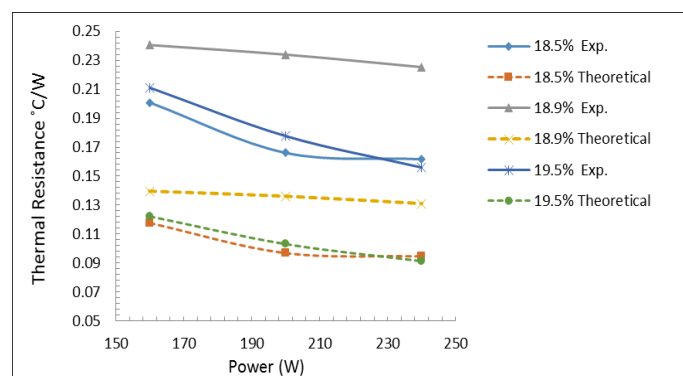


圖 22 在固定功率相關熱阻與實驗熱阻之比較

圖 22 為由 Payakaruk 等人在式(5)中討論的關係式決定垂直擺放的熱虹吸管的最小熱阻。通過觀察

獲得的實驗熱阻與理論關係式進行比較。最高熱阻出現於加熱功率為 160W 的填充率為 18.9 %時：最低熱阻出現於加熱功率為 240W 填充率為 18.5 %時。

3.9 Dowtherm-A 有效熱傳導係數與輸入熱通量 Dowtherm-A 熱阻與輸入熱通量

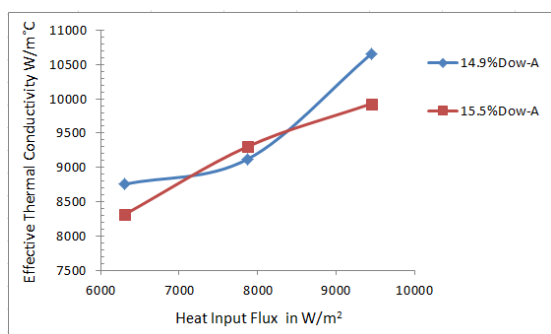


圖 23 有效熱傳導係數與輸入熱通量之比較

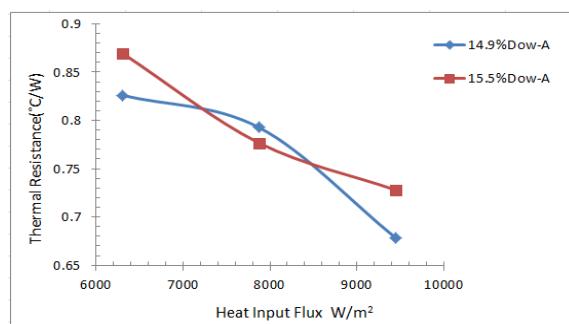


圖 24 熱阻與輸入熱通量之比較

圖 23 顯示出了相對於輸入熱通量的有效熱導率的變化。可觀察到對於不同的熱虹吸管，由於輸入熱通量增加，有效熱導率相對應增加。在實驗中所有情況下使用的熱虹吸管，可觀察到有效熱導率也會隨著輸入熱通量也相對應的增加。

圖 24 顯示出了熱阻相對應輸入熱通量的變化。可觀察到對於給定的熱虹吸管，由於輸入熱通量增加，熱阻會相對應的降低。

3.10 Dowtherm-A 實驗熱阻與相關熱阻

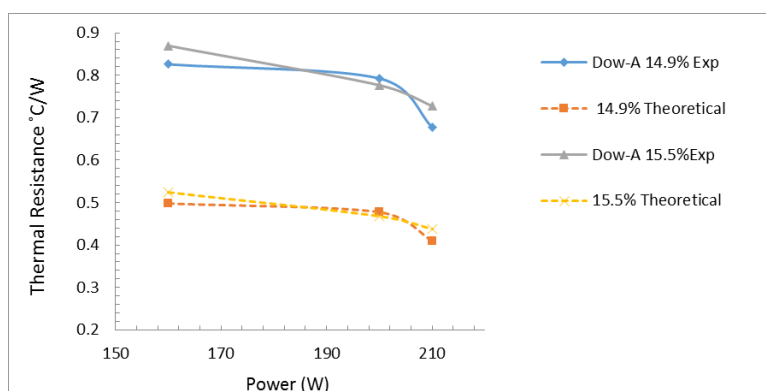


圖 25 在固定功率相關熱阻與實驗熱阻之比較

在圖 25 為由 Payakaruk 等人在式(5)中討論的關係式決定垂直擺放的熱虹吸管的最小熱阻。通過觀

察獲得的實驗熱阻與理論關係式進行比較。最高熱阻出現於加熱功率 200W 填充率為 14.9%時；最低熱阻出現於加熱功率為 210W 填充率為 14.9 %時。

4 結論

- (1) 每個熱虹吸管的熱阻隨功率輸入的增加而減小。
- (2) 在水熱虹吸管中，最小熱阻出現於加熱功率 240W 且填充率為 19.5 %。
- (3) 以 Dowtherm-A 為工作流體之熱虹吸管，在加熱功率為 210W 時，填充率 14.9%之熱阻會小於 15.5 %；填充率 14.9%之有效熱傳導係數會大於填充率 15.5 %。
- (4) 與文獻關係式比較 90 度傾角下的最小熱阻誤差約達 40 %。

符號說明

R_{th}	整體熱阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	A_{th}	熱虹吸管表面積 (m^2)
$T_{e,av}$	蒸發端之平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	Ku	Kutateladze Number
$T_{c,av}$	冷凝端之平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	Q	整體熱傳率 (W)
Q_e	加熱功率 (W)	L_{th}	熱虹吸管之長度 (m)
Q_c	冷凝端移除之熱傳率 (W)	ρ_v	蒸氣密度 (Kg/m^3)
m_w	質量流率 (g/s)	ρ_l	液體密度 (Kg/m^3)
C_{pw}	水的比熱 ($\text{J}/\text{kg K}$)	σ_l	液體表面張力 (N/m)
$T_{w,out}$	出口水溫 ($^{\circ}\text{C}$)	g	重力係數 (m/s^2)
$T_{w,in}$	進口水溫 ($^{\circ}\text{C}$)	FR	填充率 (%)
K_{th-eff}	有效熱傳導係數 ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	R_m	最小熱阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
L	蒸發潛熱 (J/Kg)	R_{90}	熱阻實驗值 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

參考文獻

- [1] H. Jouhara, C. Kelly, and A. Robinson, “an Experimental Study of Wickless Miniature Heat Pipes Operating in the Temperature Range 200 $^{\circ}\text{C}$ To 450 $^{\circ}\text{C}$,” *See.Ed.Ac.Uk*, pp. 1–10.
- [2] W. G. Anderson, “Evaluation of Heat Pipe Working Fluids In The Temperature Range 450 to 700 K,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 699, no. 1970, pp. 20–27, 2004.

- [3] D. Zhan, H. Zhang, Y. Liu, S. Li, and J. Zhuang, "Investigation on medium temperature heat pipe receiver used in parabolic trough solar collector," Proc. ISES Sol. World Congr. 2007 Sol. Energy Hum. Settl., no. 5, pp. 1–5, 2007.
- [4] M. K. Park and J. H. Boo, "Thermal Performance of a Heat Pipe with Two Dissimilar Condensers for a Medium-Temperature Thermal Storage System," J. Appl. Sci. Eng., vol. 15, no. 2, pp. 123–129, 2012.
- [5] M.K. Park, J.H. Boo, "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).
- [6] I. Sauciuc, A. Akbarzadeh, and P. Johnson, "Characteristics of two-phase closed thermosiphons for medium temperature heat recovery applications," Heat Recover. Syst. CHP, vol. 15, no. 7, pp. 631–640, 1995.
- [7] P. K. David Reay, Ryan McGlen, Heat Pipes 6th Edition Theory, Design and Applications.

作者简介:

呂承禹，男，淡江大學機械與機電工程學系，碩士研究生，1993 出生

馬哈多，男，淡江大學機械與機電工程學系，碩士研究生，1993 出生

康尚文，男，淡江大學機械與機電工程學系，教授，1958 出生