

# 不銹鋼-鈉高溫熱管之研製

葉桓銘, 吳喜翔, 康尚文

淡江大學機械與機電工程學系, 25137

Tel: 886-02-2621-5656#3281, E-mail: swkang3114@gmail.com

**摘要：**熱管在中高溫能量傳遞與儲存系統扮演著非常關鍵的角色，應用領域包括太陽能集熱系統與廢熱回收等。本研究製造了一個高溫熱管，應用於史特靈發動機集中太陽能發電(concentrated solar power)系統。實驗中以高溫爐進行熱管性能測試，管材和不鏽鋼網分別由 Inconel 600 及 316 不鏽鋼製成，工作流體為金屬鈉，熱管的長度、外徑、內徑和管壁厚度分別為 420 mm、13 mm、9 mm 和 2 mm，填充率為 10 % (2.86 g)。高溫熱管以不同傾斜角度進行性能測試，設定 8 個溫度感測點測量管壁溫度，並比較有穿網與無穿網的熱管啟動機制。實驗高溫爐輸入功率設定為 800 W，溫度設定為 800-1000 °C，實驗結果有穿網垂直擺放之性能較佳，其最低溫熱阻值為 0.1 °C/W。

**關鍵字：**熱管，金屬鈉，不鏽鋼網

## 1 前言

熱管(Heat Pipe)是依靠本身內部工作流體的兩相變化來達到傳熱的元件。圖一顯示熱管的示意圖。熱管在一端吸收外部熱量此端為蒸發端(Evaporator)，工作流體因相變成為汽態，並迅速傳遞熱量熱管至另一端，由於熱管的另一端溫度較低，當高溫氣體到達較冷的另一端時便開始冷凝成液態此端為冷凝端(Condenser)，冷凝過後的工作流體透過金屬管壁內的毛細結構(Wick)，利用毛細力將工作流體帶回蒸發端，如此完成一次熱傳循環。由於內部的兩相流熱傳機制，使得熱管傳熱能力是一般同金屬管材的數百倍以上，並擁有最佳可靠度、重量輕及無需外力輔助作動等優點。

1963 年美國洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)國家實驗室的喬治格羅佛(George Grover)發明一種稱為「熱管」的傳熱元件，結合熱傳導率和相變的原理，透過此元件將熱源處的熱量快速傳遞到熱源外處，導熱能力超過目前已知的金屬導熱能力[1]。

熱管最早被運用在軍事、航太等高科技工業，自從導入在散熱產業界上，讓以往靠著傳統風機散熱設計有一大新突破，以電腦產業來說，運用在電腦硬體設備散熱裝置使用率最高莫過於 CPU、GPU 等高熱源硬體。高溫熱管則具有高傳熱能力、高等溫性和變熱流密度能力等特點，廣泛的應用在對啟動時間有嚴格限制的場合，如超高速飛行器機翼邊緣的冷卻散熱和集中式太陽能熱發電系統上[2]。

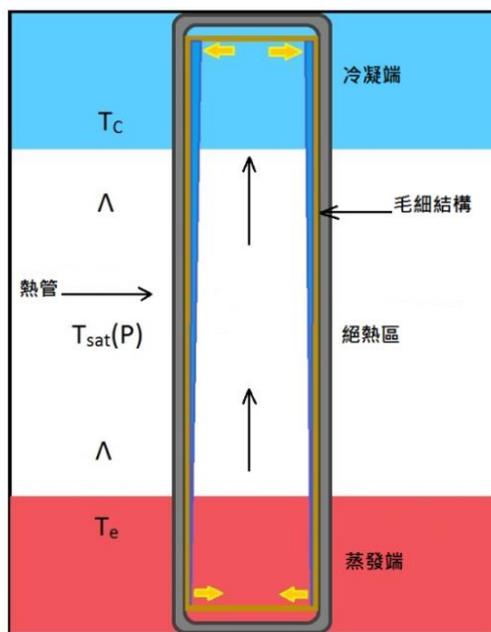


圖 1 熱管作動示意圖

2011 年曲偉等人對高溫熱管與超高溫熱管的相容性進行了研究，提出微電池腐蝕的理論，對管材與工作流體的要求，並設計、製造了金屬鈉高溫熱管與金屬鋰高溫熱管，分析熱管的傳熱特性，超高溫熱管在更高的溫度會有更大的熱通量[3]。

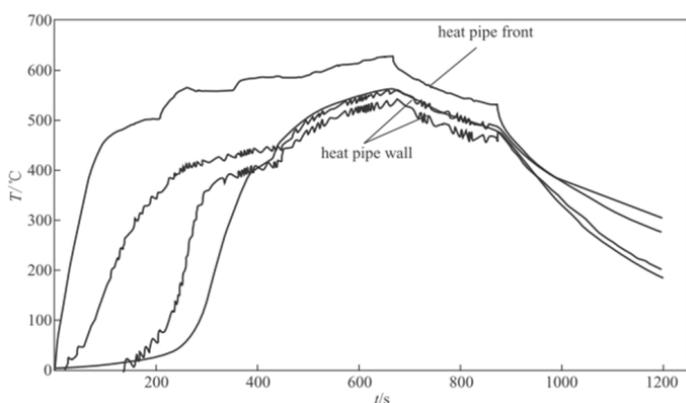


圖 2 在石英燈輻射加熱時各測點的溫度[3]

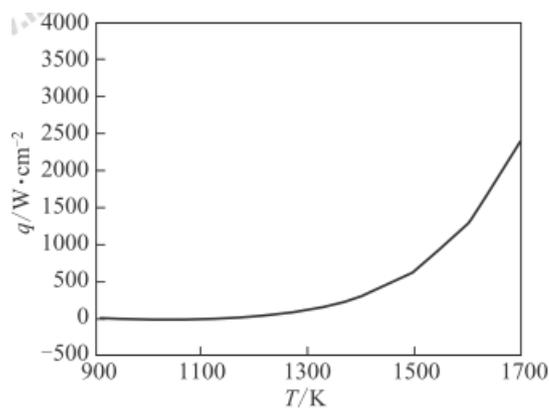


圖 3 超高溫鋰熱管的聲速極限[3]

2003 年趙蔚琳等人實驗不同的熱管結構參數與不同充填量對高溫熱管的啟動性能的影響，實驗結果發現蒸發段長度過短或是工作流體充填量過多、過少都會造成高溫熱管的啟動失敗[4]。

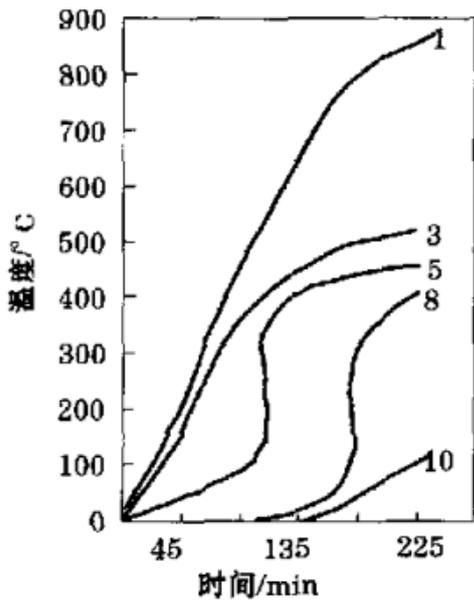


圖 4 序號 1 熱管啟動過程溫度分佈曲線[4]

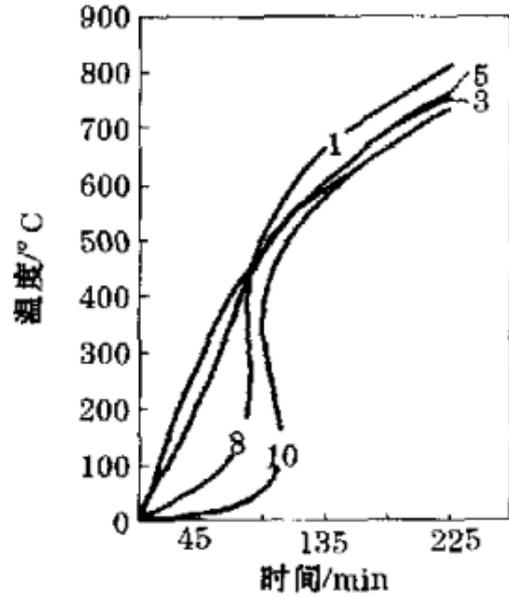


圖 5 序號 4 熱管啟動過程溫度分佈曲線[4]

2009年，丁莉等人實驗了在不同的角度、輸入功率和加熱方式量測高溫熱管的啟動性能的變化情形，實驗發現輸入功率越大，高溫熱管啟動時間越短，熱管的傾斜角度對於啟動性能並沒有明顯影響如圖六和圖七所示[5]。

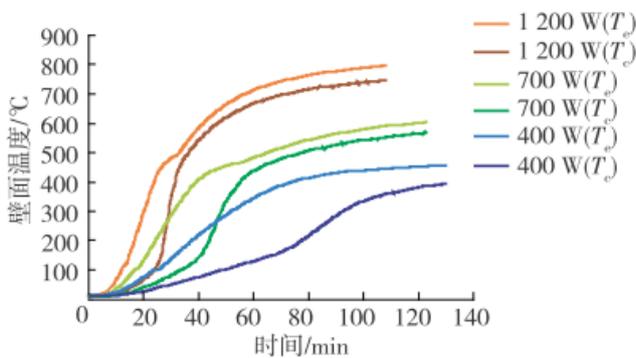


圖 6 不同輸入功率的啟動曲線[5]

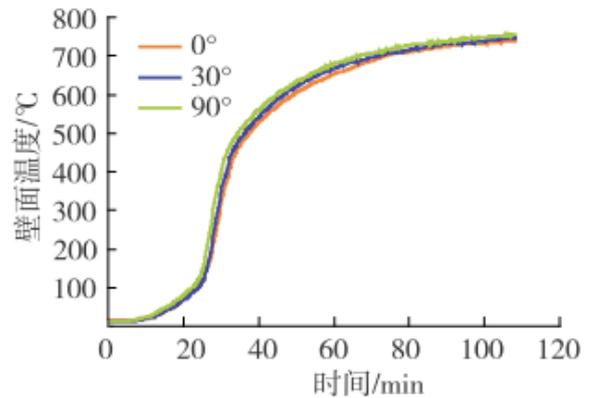


圖 7 不同傾角的熱管啟動溫度分佈[5]

不鏽鋼鈉金屬熱管(Sodium Heat Pipe)一般指工作溫度介於 600 °C~1200 °C 之間的熱管，鈉的潛熱非常大，而且在高溫下的飽和壓力較小，金屬鈉在常溫下是固態(表 1)，但易氧化的金屬鈉即便在微氧環境下也容易產生氧化結晶現象。為確保充入的工作流體具有較高的純度，達到高純工質的無氧化要求等。在封裝工作流體前，充填環境需保有足夠高的真空度。

表 1 工作流體金屬鈉之參數

流體	Na	K	Cs	NaK
熔點(°C)	97.8	63.2	28.4	-12.7
沸點(°C)	881.4	756.5	668.4	785
蒸汽壓力(KPa)	75.99	222.9	432.65	175.29
表面張力(N/m)	0.121	0.058	0.030	0.067
溶液的黏滯係數(Pa.s)	0.000162	0.000116	0.000138	0.000129
潛熱(MJ/kg)	4.41	2.05	0.50	2.57

本研究報告包含熱管的發展、高溫熱管製造、與熱管性能測試及傾斜角度變化測試。參閱其他文獻之高溫熱管性能分析進行簡敘與比較，並提出實驗結果與討論。

## 2 實驗方法

### 2.1 熱管製程

圖 8 為熱管製程流程圖。

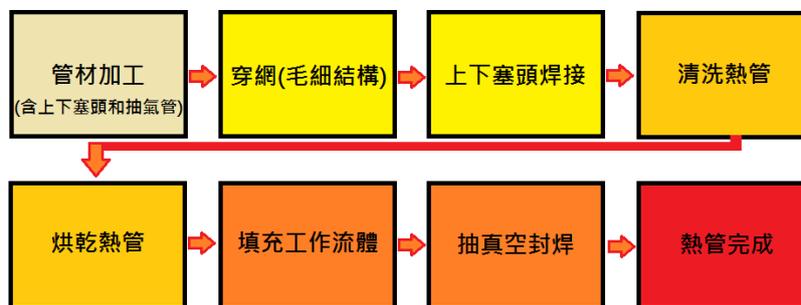


圖 8 熱管製程流程圖

熱管使用長度 420 mm 外徑 13 mm 內徑 9 mm 及管厚度 2 mm 的 Inconel 600 不鏽鋼管。管端與底端各以 Inconel 600 實心管材加以加工做為封管塞頭。在各端塞頭及管材周圍採用氬銲接密，為確保塞頭與管材焊接氣密，使用 PhoeniXL 300 洩漏探測器進行熱管的測漏試驗。為在熱管管壁產生毛細作用，將一層 100 目數的 316 不鏽鋼網穿進管材並與貼合管壁作為管壁的毛細結構如圖 9 所示。



圖 9 熱管穿網圖

製程過程中有少許的金屬雜質與油脂汙染在管內，分別以丙酮與去離子水注入管內，並使用超音波清洗機進行清洗。為確保管內的水氣是否排乾，將整支管子進行加熱動作，排除管子與毛細結構內的水氣逼出，防止後續填充時發生工作流體與水份產生化學反應。此熱管的工作流體為金屬鈉，填充率 10 % 總重為 2.86 g，並於管端上的抽氣管充入管內。管內真空度會影響工作流體與熱管啟動速度，將以 PhoeniXL300(圖 10)洩漏探測器進行抽真空，真空值為  $10^{-8} \sim 10^{-12}$  Torr (mmHg)完成抽真空程序後，予以封焊。



圖 10 PhoeniXL 300

## 2.2 實驗裝置與方法

圖 11 為熱管性能測試的實驗裝置，熱管的擺放為垂直方向，且放置在高溫爐中央位置。整支熱管由蒸發端、絕熱端與冷凝端構成。蒸發端範圍長約 230 mm;冷凝端範圍長 100 mm。



圖 11 高溫加熱爐與電源供應器

如圖 12 所示個測量點的位置，所測到的溫度數據經由溫度擷取器回傳到電腦整合成數據圖表，連續記錄溫度數據可觀察熱管每個各點的溫度及溫度差。為確保每個點的溫度更為精準，使用隔熱罩將冷凝端蓋起確實保溫，不受外在環境自然對流的影響。本研究實驗裝置加熱爐輸入功率為 800 W，並於穩態時觀察熱管性能表現及各段溫度的數值變化。圖 13 及圖 14 為熱管被加熱至燒紅圖。

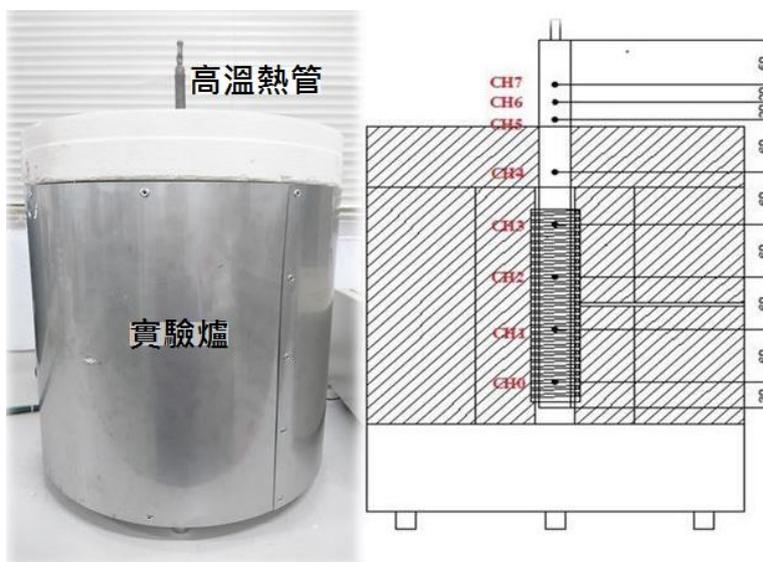


圖 12 溫度擷取點各個位置示意圖



圖 13 燒紅的高溫熱管



圖 14 燒紅的高溫熱管

熱管的熱阻值可表示為

$$R_{hp} = \frac{\Delta ch}{Q_{in}} = \frac{\frac{1}{4} \sum_0^3 ch_e - \frac{1}{4} \sum_4^7 ch_c}{Q_{in}}$$

$\Delta ch$  為蒸發端和冷凝端的平均溫差。 $Q_{in}$  為電源供應器給加熱爐傳到熱管的輸入功率。

### 3 結果與討論

本實驗探討不銹鋼 Inconel 600 管填充金屬鈉為工作流體之熱管性能，不同傾斜角度對熱性能之影響及有無金屬網毛細結構之比較。並利用各擷取點的溫度及蒸發端與冷凝端之溫差，計算出熱管之熱阻。每組熱性能測試之數據，加熱爐功率設定值均為 800 W，加熱線圈加熱由 CH2 開始上下依序漸進式加熱。

#### 3.1 穿網熱管與無穿網熱管啟動機制性能比較

有穿網與無穿網之熱管尺寸與填充量均為一樣，兩支熱管均擺放垂直位置，並固定功率 800 W 開始加熱。圖 15 為無不銹鋼網熱管之溫度曲線圖，另圖 16 為有不銹鋼網熱管之溫度曲線圖。由此二圖可發現，兩者有很明顯不同的啟動表現，蒸發端之工作流體產生蒸氣開始由下往上傳熱至冷凝端。由圖 16 顯示，穿網熱管最先明顯啟動，CH3 溫度首先明顯上升，過 10 分鐘後之 CH4、5、6、7 溫度亦明顯快速上升。圖 15 顯示，無穿網各擷取點溫度均為緩慢上升，並無穿網熱管之明顯啟動機制存在。

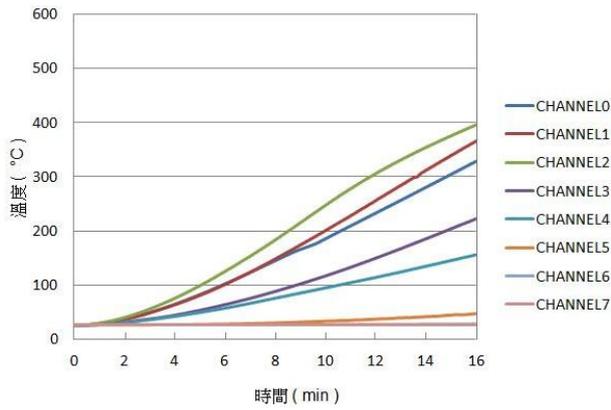


圖 15 無不銹鋼網熱管之溫度曲線圖

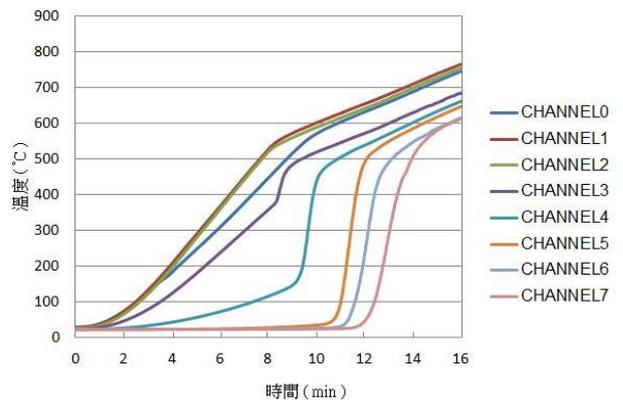


圖 16 有不銹鋼網熱管之溫度曲線圖

### 3.2 穿網熱管之傾斜角度熱性能測試

利用穿網熱管探討不同傾斜角度是否會影響熱管之熱傳導性能。傾斜角度分別為正 90 °與 45 °，並擷取熱管上八個溫度 K 型熱電偶溫度感測點的溫度。圖 17 為正 90 °擺放之溫度曲線圖，CH0 到 CH7 均約在 10 分鐘後啟動熱管並持續升溫，到各測量點穩態(Steady state)狀態 2 小時後，蒸發端 CH0 與冷凝端 CH7 兩端溫差約 100 °C。

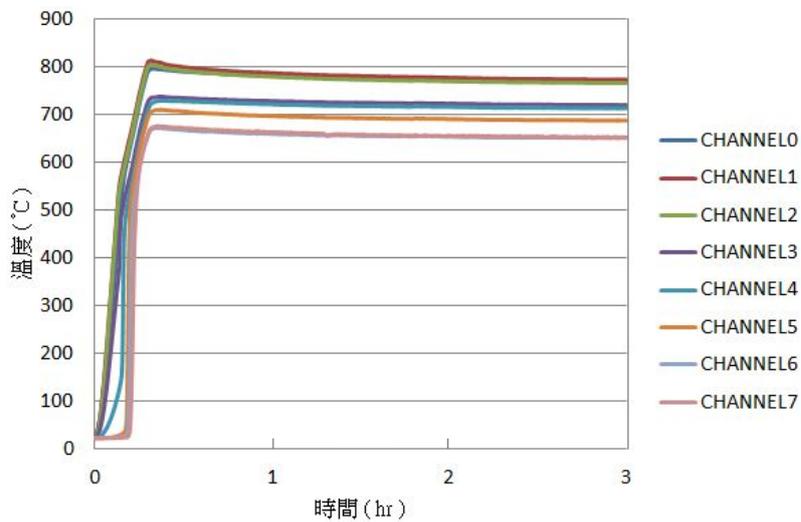


圖 17 正 90 °擺放之溫度曲線圖

圖 18 為正 45 °擺放之溫度曲線圖，明顯發現與正 90 °擺放時，熱管啟動時間點有稍為差距，比正 90 °啟動時間約晚 4 分鐘時間，而蒸發端 CH0 與冷凝端 CH7 之溫差約為 150 °C 與先前正 90 °擺放方式相差多約 50 °C。

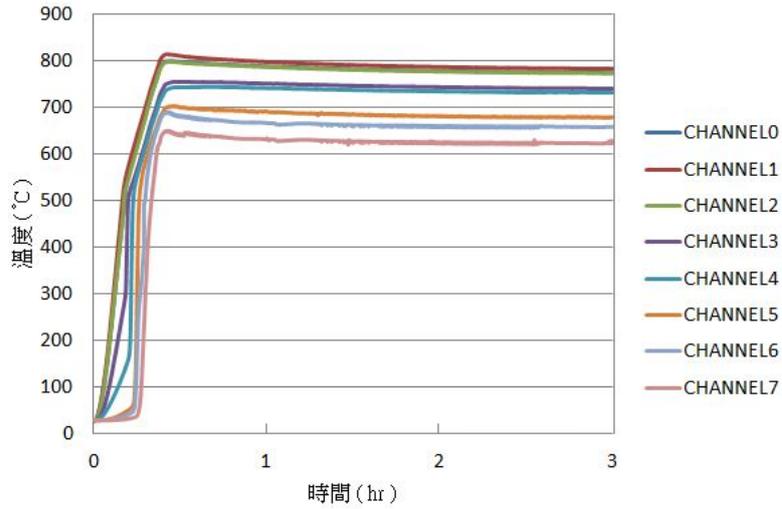


圖 18 正 45 °擺放之溫度曲線圖

### 3.3 熱管之熱阻計算比較

圖 19 為無穿網、有穿網與有穿網正 45 °角度擺放之熱管熱阻值比較圖。利用先前熱管擷取之各點溫度，以蒸發端與冷凝端之各平均溫差 $\Delta ch$  除以加熱爐所對熱管的總功率  $Q_{in}$  並可得知熱管的熱阻值。比較有穿網及無穿網與正 45 °之熱管熱阻值。圖所示結果為有穿網熱阻值為最低，無穿網正 90 °之熱管熱阻最高，而有穿網正 90 °角度之熱阻值比有穿網正 45 °低了 0.02 °C/W。

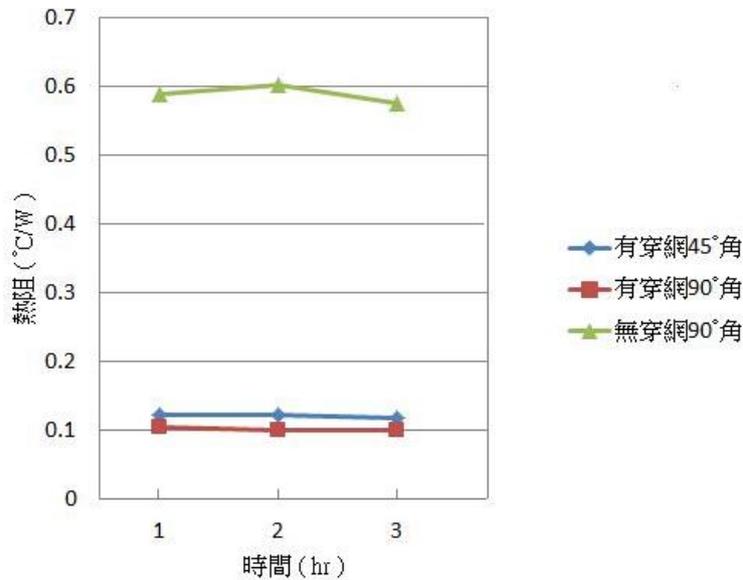


圖 19 熱管熱阻值比較圖

### 3.4 與相關文獻比較

文獻[6]之熱管使用 GH4169 合金鋼，長度與管徑分別為 320 mm、 $\phi 40$ ，蒸發端區域為 100 mm 另冷凝端區域為 220 mm。工作流體為金屬鈉並使用 100 目數之不銹鋼網作為毛細結構。熱管測試以 8 個 K 型熱電偶溫度感測線，分布量測熱管個點的溫度。實驗方法利用高週波加熱器功率去控制熱管啟動時間，探討功率大小是否影響熱管啟動時間，且利用不同傾斜角度去對熱管做熱性能測試，比較說不同傾斜角之熱管是否影響啟動所需時間。根據內文結果數據顯示，越高的加熱功率會加速熱管啟動時間，對於不同傾斜度對於啟動時間不會有太大的差別。圖 20 為內文熱管正 90° 傾斜角度測試之溫度曲線圖。由於文獻中之測試功率表大於本研究，故其啟動時間較短，但本研究之高溫熱管之均溫性較好，是由於兩者加熱方式不同所致。

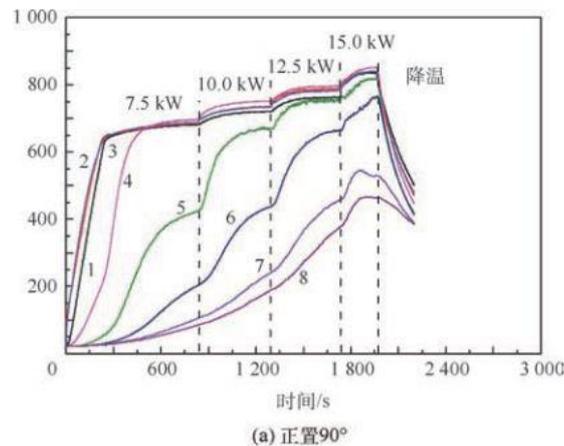


圖 20 熱管正 90° 傾斜角度測試之溫度曲線圖[6]

## 4 結論

本論文研製金屬鈉高溫熱管，提出熱管製造過程與性能測試。使用長度、外徑、內徑及厚度分別為 420 mm、13 mm、9 mm、2 mm 之 Inconel 600 不銹鋼管，工作流體為金屬鈉，填充率為 10% (2.86 g)。以下為幾點結論：

- 4.1 對於有穿網與沒穿網之熱管比較，實驗結果顯示有穿網熱管啟動非常的明顯迅速，溫度也快速上升，對比無穿網之熱管則無這現象溫度只有緩慢的爬升。實驗結果顯示工作流體金屬鈉藉由金屬網產生毛細現象，順利在熱管內快速傳遞循環。
- 4.2 不同角度測試之影響比較，以實驗中正 90° 與 45° 兩傾角測試結果數據，明顯發現各點溫度差會隨著熱管角度變化，45° 比 90° 在 CH4 到 CH7 溫差兩者更增加約 50 °C。實驗結論指出 90° 傾斜角度熱管性能確實優於 45° 傾斜角度熱管。
- 4.3 實驗結果顯示，有穿網熱管熱阻(0.1 °C/W)性能明顯優於無穿網熱管熱阻(0.58 °C/W)。

## 5 致謝

感謝科技部 105-2622-E-006-006-CC2 號計畫之經費協助。

## 參考文獻

- [1] G. M. Grover, T. P. Cotter, G. F. Erickson, "Structures of Very High Thermal Conductance," Journal of Applied Physics, Vol. 35, pp. 1990-1991 (1964).
- [2] Byoung In Lee, Sung Hong Lee, Manufacturing and Temperature Measurements of a Sodium Heat Pipe, KSME International Journal, vol 15 No 11, pp. 1533~1540, 2001.
- [3] 曲偉, 王煥光「高溫及超高溫熱管的相容性和傳熱性能」, 化工學報, 62(S1): 0438-1157, 2011。
- [4] 趙蔚琳, 庄駿, 張紅「蒸發段長度與充液量對高溫鈉熱管啟動過程的影響」, 化工機械, 30(5): 0254-6094, 2003。
- [5] 丁莉, 張紅, 許輝, 白鏗, 劉亞雷, 庄駿「太陽能接收器中高溫熱管啟動性能」, 南京工業大學學報: 自然科學版, 31(5): 1671-7627, 2009。
- [6] 牛濤, 張艷苓, 侯紅亮, 等. 高溫熱管性能分析與試驗[J]. 航空學報, 2016, 37(S1): S59-S65. NIUT, ZHANGYL, HOUHL, et al. Properties of high-temperature heat pipe and its experiment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(S1): S59-S65.

### 作者簡介:

葉桓銘, 男, 淡江大學機械與機電工程學系, 碩士研究生, 1994 出生

康尚文, 男, 淡江大學機械與機電工程學系, 教授, 1958 出生

吳喜翔, 男, 淡江大學機械與機電工程學系, 碩士研究生, 1993 出生