

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽能聚光高溫液態金屬熱管之先期研究

**Preliminary studies of Concentrated Solar High-Temperature Liquid
Metal Heat Pipe**

計畫編號：1042001INER007

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：104年12月15日

目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
壹、計畫緣起與目的：	3
一、計畫之背景、目的及重要性：	3
二、國內外發展情況：	4
三、材料特性概述：	6
貳、研究方法與過程	8
一、文獻資料整理.....	8
二、高溫液態金屬熱管之製作	15
三、實驗平台架設.....	17
四、實驗方法與分析.....	18
(一)高溫熱管垂直傳熱測試結果.....	19
(二)高溫穿線熱管垂直傳熱測試結果.....	21
參、主要發現與結論	22
肆、參考文獻	23

中文摘要

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，但目前國內並無相關設計與製造技術，因此本計畫擬完成高溫熱管的先期研究開發。

本計畫針對高溫熱管部分提出兩項相關研究，第一項分析鹼性金屬在虹吸熱管容器內之相容性及毛細結構匹配性並建立鹼性金屬充填安全標準化機制；第二項為液態鹼性金屬虹吸熱管之製作與測試，探討充填後內部飽和蒸氣壓之變化、最大熱傳量、熱阻值、啟動機制，對高溫液態鹼性金屬熱管進行基礎研究。

Abstract

Heat pipes have been considered as promising means for effective heat transfer in energy transport and storage systems in a medium-high temperature range, such as concentrated solar thermal energy systems and waste heat recovery. But up to now there is no relevant design and manufacturing technology, Therefore, the proposal is to advance research and development of high temperature heat pipes

There are two related research points put forward for high temperature heat pipe about this plan. The first point is to analyze the alkaline metal in the thermosyphon containers, the capillary structure matching and establish the alkaline metal safety standard mechanism of filling. The second is the production and testing of liquid alkali metal thermosyphon, to explore the changes of saturated vapor pressure, the maximum heat transfer, thermal resistance, startup mechanism .

壹、計畫緣起與目的：

一、計畫之背景、目的及重要性：

在元素表中鹼金屬一族具有很多相似性質，由於鹼金屬化學性質都很活潑，且很容易與空氣或水發生反應，原子量越大（越「重」）的鹼金屬，反應越為劇烈。因為它具有較高活性常被運用在一些能量儲存或熱傳遞上，如鋰電池及太陽能熱吸收器等。

目前政府積極推廣太陽能產業，一則是以多晶、非晶及單晶矽太陽能電池發電為主，而另外一種方法即是利用太陽能熱能發電[1]。國內現況目前仍大都以太陽光電為主，而聚焦式太陽熱能發電技術仍在啟蒙階段。然而國際能源總署資料統計，約在 2050 年後聚焦式太陽熱能發電技術將會與太陽光電發電並駕齊趨。所以國內產學界已加緊腳步積極投入太陽熱能發電技術開發，而太陽熱能吸收器亦是碟式史特靈發電系統的關鍵組件，其性能將決定聚焦式熱能發電系統的整體效率與運轉穩定性，而太陽熱能吸收器也就是液態鹼金屬高溫熱管為主之組件。所以液態鹼金屬高溫熱管決定了熱能發電系統的運轉效率及穩定性，其重要性可想而知。

一般來說「熱管」依工作溫度可區分為低溫熱管、常溫熱管、中溫熱管及高溫熱管等，其結構會隨著傳熱量及工作溫度不同有所差別。一般熱管之使用早已被廣泛運用在產業中，而中、高溫熱管因充填之

工作流體之不同而有所差異。不像一般低常溫之熱管是以純水做為工作流體，在製造封裝與測試上門檻較低也較安全。而相較之下，中高溫熱管之工作流體是使用活性高、易燃燒爆炸之液態鹼金屬，相對之下製造封裝與測試門檻相較提高。

所以本計畫針對液態鹼金屬高溫熱管提出研究計畫，探討鹼性金屬與熱管容器之相容性及高溫熱管之熱性能等，如何純化充填及封裝，充填後內部飽和蒸氣壓之變化探討，完成標準化安全之充填封裝技術及標準測試平台等，將相關技術建立一套可供產業界製造太陽熱能吸收器研究參考之重要依據。

二、國內外發展情況：

太陽能發電系統發展可追溯至 1872 年。在 1970 至 1980 年代初期美國能源部主導之計畫中，美國能源業者與國家實驗室合作研發製造太陽能碟型集熱式發電系統。發電系統為了能夠獲得高溫熱能避免天候及地理因素影響，乃採用追蹤式碟型集熱器之設計，如圖 1.所示。此追日系統可追蹤陽光方向及軌跡，並將太陽光聚焦於引擎之熱接收器（receiver）上。此系統之工作溫度 750 °C，可獲 5~25 kW 之發電量與 12%~29.4 %之系統效率[2]。

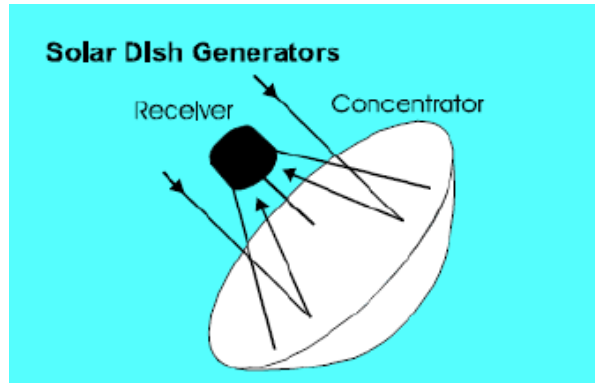


圖1. 追蹤式碟型集熱器太陽能發電系統示意圖

其中聚焦於引擎之熱接收器，就是液態鹼金屬高溫熱管，它能夠有效又迅速將聚焦之太陽熱能傳遞置引擎內部避免效能散失，其中關鍵因素就是驅動熱接收器之工作流體液態鹼金屬。

2002 年 James Moreno[3] 等人於第 37 屆國際能源會議中 (International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC))，提出碟型之熱吸收器史特靈引擎設計討論得知，75 kW 熱吸收器之啟動溫度需要 750°C ，方能驅動熱接收器之工作流體液態鹼金屬鈉，其傳遞溫度之熱效率約為 68%，但可透過外部絕熱材料處理防止熱損失，進而提高傳熱效率達到 75%。其中充填之液態鹼金屬在測試中之洩漏、容器受蒸氣壓翹曲變形等均為研究考慮之重要因素之一。

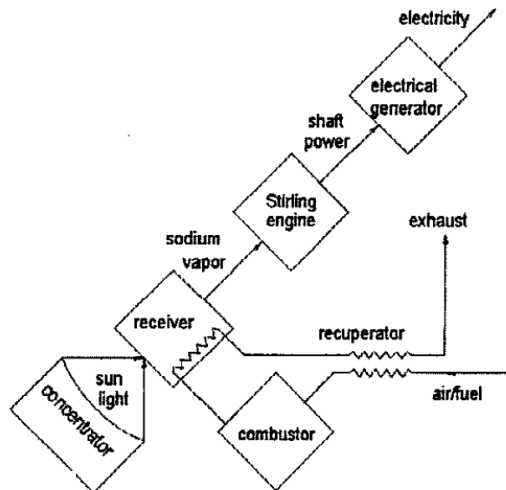


圖 2. Hybridization adds a combustor and two heat exchangers to the existing concentrator, receiver, engine, generator, and controls.

如圖2系統中之熱接收器(receiver)，扮演史特靈發電系統的關鍵組件，因此種種跡象再再顯示液態鹼金屬高溫熱管之地位不容忽視。針對國內部份，對液態鹼金屬高溫熱管之研究需及時進入方能加以結合太陽能產業，使國內太陽能產業更加蓬勃發展。

三、材料特性概述：

本計畫中所使用之液態鹼金屬其主要關鍵材料特性說明如下：鹼金屬在元素週期表中是屬於同一族群，其元素金屬包含鋰、鈉、鉀、銣、鉍、鎂。鹼金屬具有很多相似性質，它們都是銀白色的金屬、密度小、熔點及沸點都比較低、標準狀況下具有很高的活性反應，由於鹼金屬化學性質都很活潑，一般將它們放在礦物油中或封在稀有氣體中保存，以防止與空氣或水發生反應，比如鉍加入水中所引發的爆炸會比鉀更劇烈[4]。

(1)物質安全資料表：

物質安全資料表（Material Safety Data Sheet，MSDS）是一個包含某種物質相關數據的資料庫。產品管理和工作場所的安全均是一個非常重要的環節。MSDS 它的目的是提供給工人和緊急救護人員一個安全的方式來適當處理這些物質。同時它也包含這些物質的一些其他信息，物理和化學數據如熔點、沸點、閃點、毒性及對健康的影響、急救、反應、儲存、處置、防護設備、洩漏處理、燃爆性能等等[5]。本計畫中所探討使用之物質鹼金屬，更不容忽視對人員及環境之衝擊。

(2)鹼金屬鈉之運用：

目前常被運用在熱接收器之熱能接收處，以液態金屬鈉為媒介做為工作流體，當液態金屬鈉於密封容器內受熱蒸發，並把熱能傳給另一空間之工作氣體並產生熱膨脹壓力作功，同時蒸發之氣態鈉作完功後又會凝結為液態鈉，並藉由重力或毛細力回流至蒸發端完成一循環，並持續重複循環作功。

貳、研究方法與過程

一、文獻資料整理

	Korea[6]	U.S.A.[7]	China[8]	China[9]	Germany[10]	U.S.A.[11]	U.S.A.[12]
Length	1000mm (Stainless Steel 316)	1890mm (Haynes 230)	950mm (Stainless Steel)	400mm (Stainless Steel 314)	775mm (Inconel 600)		1143mm
Author	Byoung In Lee Sung Hong Lee	Kara L. Walker Calin Tarau William G. Anderson	趙蔚琳 庄駿	于萍 张红 许辉 沈妍	Peter Meisel Matthias Jobst, Wolfgang Lippmann, Antonio Hurtado	John H. Rosenfeld Ivan E. Locci James L. Sanzi David R. Hull Steven M. Geng	James Martin Omar Mireles Robert Reid
Diameter	25.4mm	12.7mm	32mm	32mm	10.5mm		15.9mm
Working fluid (Sodium)	65.7g		98g		11g	100g	35g
Wick	60meshX 2 Layers (Stainless Steel 316)	Grooved (Haynes 230) Sintered Arterial (Nickel powder) Self-Venting Arterial (stainless steel)	50meshX 3Layers 150meshX 3 Layers (Stainless Steel)	Combined (groove +Mesh +Sintered)	thermosyphon	100meshX 2 Layers (Stainless Steel 316)	400meshX 7 Layers (Stainless Steel 304)
condenser	Air	Cooling Block (Liquid Nitrogen)	Air-Water	Air-Water	Air	Air	Air

表 1 高溫熱管文獻資料整理

從表 1.計算後可得知，最佳充填率約是熱管總體積的 20%，冷凝端的冷卻方式則不限制自然冷卻或是強制冷卻。第一階段工作內容，探討文獻中鹼性金屬在熱管容器內之相容性及毛細結構匹配性並建立鹼性金屬充填安全標準化機制；第二階段為液態鹼性金屬熱管之製作與

測試，探討啟動機制及啟動效率等，說明如下：

1. 第一階段工作內容：探討鹼性金屬在熱管容器內之相容性及毛細結構匹配性並建立鹼性金屬充填安全標準化機制

A. 金屬容器之選擇

使用液態鹼性金屬為工作流體，探討鹼性金屬在熱管容器內之相容性及毛細結構匹配性。高溫液態鹼性金屬熱管之容器必需承受高溫達 1000°C 以上方能勝任，由於文獻中得知目前大多數使用之高溫合金鋼材，如表 2.所示。而美國熱管大廠 Thermacore[12]提出高溫熱管所使用之金屬容器可依據使用之工作溫度範圍及應用環境，分別為鉻鎳奧氏體不鏽鋼(SS300系列)、鎳鉻鐵合金(Incoloy 800)、英高鎳(Inconel 600、601、718、625)、鎳鉻鎢鉬超合金(Haynes 230、188、214)、鎳(Nickel)、鎳基合金(Hastelloy C)、鈦(Titanium)、鉭(Tantalum)、鉬(Molybdenum)、鉬合金(TZM)、銻(Rhenium)、鈮(Niobium)、鎢(Tungsten)等數種超高溫不鏽鋼材可供參考使用，本項目可能先採其中兩種合金材料使用，其簡介如下：

(a) SS304：

SS304 不鏽鋼成分中含有 18 %的鉻和 8 %的鎳，是最普遍的不鏽鋼種類，具有良好的耐蝕性、耐熱性、低溫強度和機械性能，衝壓彎曲等熱加工性好,無熱處理硬化現象，無磁性且廣泛用於家庭用品。

(b) Inconel 600 :

Inconel 600 合金具有很好的耐還原、氧化、氯化介質腐蝕的性能，在室溫及高溫時都具有很好的耐應力腐蝕開裂性能，具有很好的耐乾燥氯氣和氯化氫氣體腐蝕的性能，在零下、室溫及高溫時都具有很好的機械性能，具有很好的抗蠕變斷裂強度，適合用在 700 °C 以上的工作環境。

SS304 為普遍的不鏽鋼種類，方便取得，具良好的耐蝕性、耐熱性，研究初期需使用大量的管材，本實驗先採用 SS304 做為高溫液態金屬虹吸式熱管容器，如圖 3 所示。未來會以 Inconel 600 型英高鎳鋼為首要使用之主體結構。

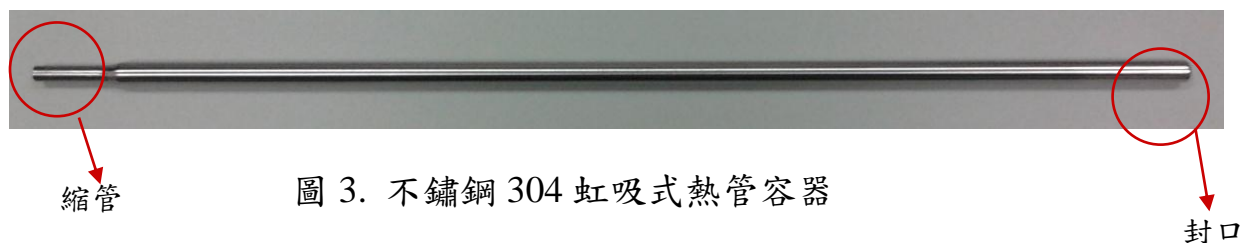


表 2 高溫合金的性能

材料	熔點(°C)	密度 (kg/m ³)	最高使用溫度(°C)
S304	1454	7.85	800
Inconel 600	1354~1413	8.47	1093

B. 液態鹼性金屬工作流體之選擇

高溫液態金屬熱管所使用於 1000 °C 高溫下，傳統熱管使用之純水等常溫液態工作流體無法於高溫下存在，故需使用於高溫時為液態之金屬材料為工作流體，作動溫度如銫 300 – 600 °C、鉀 400 – 1000 °C、鈉 500 – 1200 °C、鋰 900 – 1700 °C，由文獻中得知目前液態金屬常用分別為金屬鈉、鉀、銫或混和金屬液等，其特性如表 3 所示，液態鈉與鈉鉀混合液簡介如下：

(a) 液態鈉

鈉的化學性質很活潑。在空氣中很容易氧化生成氧化鈉，燃燒發出黃色火焰生成過氧化鈉。和水接觸會起爆炸反應（產生高溫使自己熔成一個銀白色的圓球在水面高速移動，並不斷釋放氫），生成氫氧化鈉（鹼性溶液），與醇反應生成醇鈉。因此通常保存在煤油中。鈉可以和大部分元素反應，但是很難和硼、碳、鐵和鎳反應。鈉在高溫下可以和矽酸鹽反應，侵蝕玻璃和瓷器。液態鈉在不鏽鋼管環路中最主要的腐蝕生成物為 NaCrO_2 ，主要是因為管路含有氧氣(大約 10 ppm)，生成 NaCrO_2 的原因在於接觸奧斯田鐵或者肥粒鐵(Ferritic, Fe-9Cr-1Mo and Fe-2¼ Cr-1Mo) 溫度介於 300~750 °C。

(b) 鈉鉀混合液

鈉鉀是共晶混合物[13]，大約 78%的鉀配上 22 %的鈉，但鈉鉀沒有共

同的沸點，在史特靈引擎汽缸吸收面熱管均熱裝置點，其液體與蒸汽是共存的，所以比較不利於溫度分均勻的分佈。在露點 (Dew point) 與泡點 (Bubble point) 的曲線上，在一大氣壓下 (1atm) 鈉鉀溶液所呈現的狀態，在溫度為 758 °C 時為純液體鉀，溫度要高於 882 °C 才是純鈉溶液，在 786 °C 鉀為 0.675 mole 時，有共晶線。熱管金屬容器與工作流體具相容性問題，例如鋁與水共存時容易產生氫氣等非凝結性氣體，導致熱管失效，高溫液態金屬熱管亦同，目前金屬容器與鋰、鈉液態金屬相容性如表 4 所示。

表 3 鈉、鉀、銫及鈉鉀做為工作流體的性質(工作流體)

流體	Na	K	Cs	NaK
熔點(°C)	97.72	63.38	28.44	-12.73
沸點(°C)	881.43	756.52	668.41	785.43
蒸汽壓力(KPa)	75.99	222.92	432.65	175.29
表面張力(N/m)	0.12	0.05	0.03	0.06
溶液的黏滯係數 (Pa.s)	1.62 E-4	1.16 E-4	1.38 E-4	1.29 E-4
潛熱(MJ/kg)	4.41	2.05	0.50	2.57

表 4 相容性試驗的一般結果

	不鏽鋼	鎳	鎳基合金	鎢	鉭	鉬	銻	鈦	鈮
鋰	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	✓
鈉	✓	✓	✓	—	—	—	—	x	✓

✓有試驗證明相容；x有試驗證明不相容；—尚未試驗相容性

真空純化充填機制：

傳統熱管於充填工作流體時會降低容器內部壓力，使工作流體內之非凝結性氣體脫離，同時降低流體飽和溫度並避免容器壓力過大導致熱管破裂。高溫液態金屬熱管也需對容器抽取真空降低內部壓力，依據真空壓力值的不同區分低、中、高等真空環境區域，如

表 5 真空區域劃分

5 所示。高溫液態金屬熱管於已知之充填方法為「蒸餾灌鈉」法，將金屬鈉加熱後融熔為流體，藉由鈉閥流入 U 型管內，然後再流入蒸餾罐並將流體汽化，脫出非凝結性氣體再經由冷凝管冷卻回流體，後進入三通處進入金屬容器中，並由真空機組來調整適當的真空度來完成熱管的蒸餾充裝，充填後金屬容器封口密封確保真空度，其設備示意圖，如圖 4 所示。

因鹼性金屬化學性質都很活潑，在標準狀況下具有很高的活性反應，

由於在安全考量之下需具有安全防護設備來進行真空充填，建立鹼性金屬充填安全標準化機制有絕對之必要性。

另一充填方式為「非蒸餾灌鈉」法，主要是為了使充填過程簡單化，可同時一個或多個熱管被填充，如圖 5 所示。非蒸餾充填灌鈉法是在真空設備中實施，透明手套箱需用氫氣保護產生正壓，有效排除空氣與水氣，在三條超高真空管路及閥門下，可同時進行鹼金屬熱管充填作業。其動作順序為先切斷主管路之閥門開關，並將鹼金屬放入透明手套箱內並用氫氣保護，使該空氣置換為氫氣。在此手套箱中操作將鹼金屬鈉做切斷、稱重並填入熱管填充容器內，於該出口設置不鏽鋼篩網防抽真空時被吸出。然後將填充容器提升和系統耦合並將閥門關閉抽真空。在此過程中，該系統的主要管路需充滿氫氣產生正壓，有效排除空氣與水氣。

表 5 真空區域劃分

區域	壓力(Pa)	分子數密度 $n(\text{cm}^{-3})$	平均自由程 $\lambda(\text{cm})$
粗真空	$1.01 \times 10^5 \sim 10^3$	$\sim 10^{18}$	10^{-4}
低真空	$10^3 \sim 10^{-1}$	$\sim 10^{15}$	10^{-1}
高真空(HV)	$10^{-1} \sim 10^{-6}$	$\sim 10^{10}$	10^3
超高真空(UHV)	$10^{-6} \sim 10^{-12}$	$\sim 10^6$	10^9

極高真空(XHV)	$<10^{-12}$	$<10^2$	$>10^{12}$
-----------	-------------	---------	------------

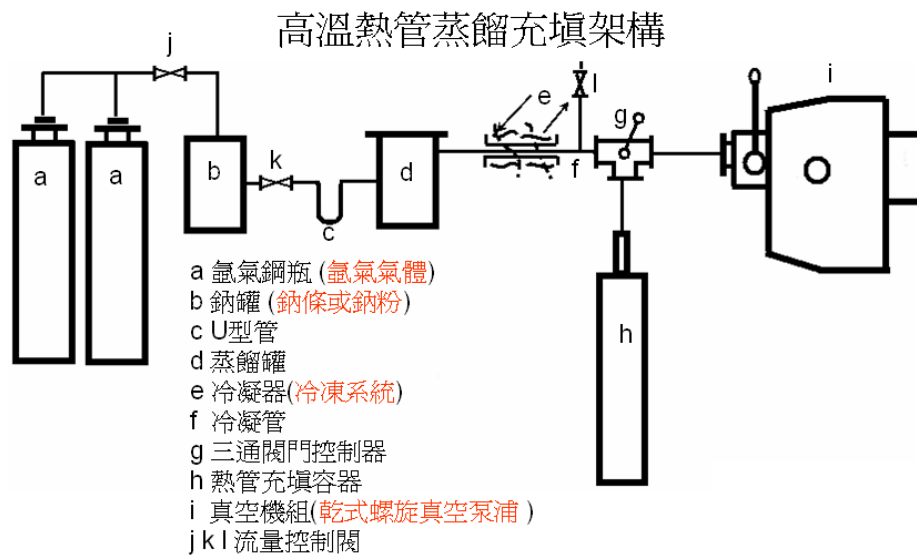


圖 4. 高溫熱管蒸餾充填架構

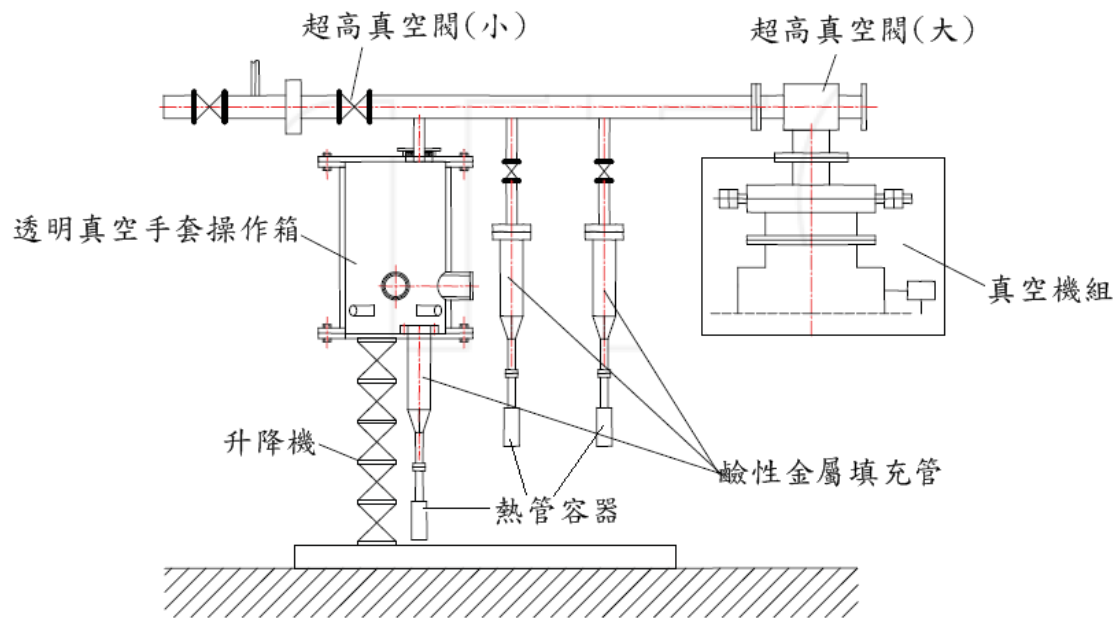


圖 5. 非蒸餾灌鈉法充填技術

二、高溫液態金屬熱管之製作

本項目第二階段主要為研究高溫熱管使用之毛細結構(圖 6)，毛細結構藉由結構本身之毛細作用力與流體本身表面張力，由熱管冷凝端傳輸工作流體至蒸發端，達到不斷提供流體進行相變化作用，且具有提升熱傳性能功效。目前傳統熱管所使用之毛細結構多數為溝槽、燒結、銅網及複合式等數種，而高溫液態金屬熱管毛細結構之相關資料在文獻中甚少提及，且對於液態金屬於毛細結構內之特性較難量測，高溫熱管容器先採用無毛細結構進行設計，再針對高溫熱管毛細結構進行研究，根據文獻以不鏽鋼網目式毛細結構進行實驗測試及分析。

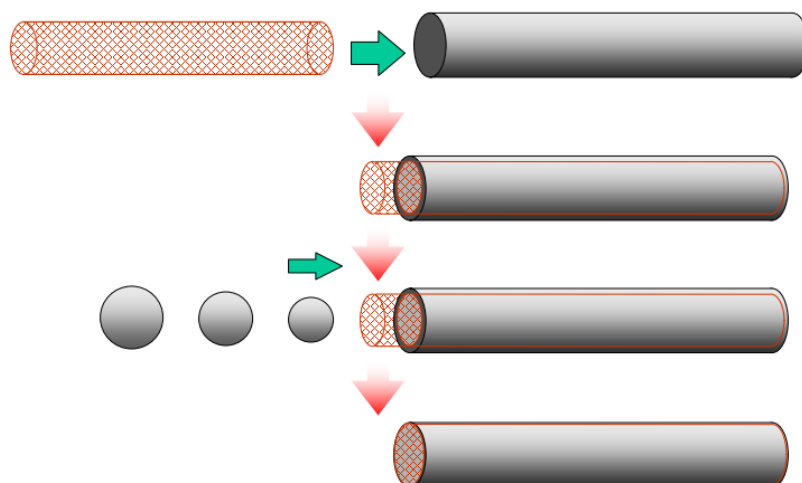


圖 6. 高溫熱管不鏽鋼網目結構製作示意圖

使用中、低溫熱管現有的製程設備，充填高溫熱管，使用手套箱在低水氧環境下充填金屬鈉，充填完畢後鎖上充填頭，拿出手套箱進行抽氣、壓合、剪斷及焊接，由圖 7 所示。



手套箱充填



抽真空及夾管封口



切管焊接封口完成

圖 7. 高溫熱管充填

三、實驗平台架設

本實驗之高溫液態金屬熱管熱性能實驗平台分別由高溫加熱器、冷凝裝置、溫度量測設備、交流電源供應器所組成，並附有耐熱裝置，以避免高溫熱管作動過程中因內部壓力過大或焊接結合不佳導致破裂等問題發生。加熱器採用超高溫陶瓷加熱器，其導熱佳、升溫快，與金屬管，玻璃管和其它非金屬類電熱元件相比，在功率相同的情況下，體積只有其 1/8 ~ 1/3；或同等體積下超高溫陶瓷發熱體功率是其它發熱體功率的 3~10 倍。輕巧、不佔空間，可設計小型化電熱器具，實驗過程加熱器溫度達 800 °C，其溫度值與環境溫度落差極大，為使加熱器及高溫液態金屬熱管不受外界環境影響而干擾到實驗數據，將

高溫熱管蒸發端、絕熱端及加熱器以隔熱棉包覆，確保溫度不易散失，溫度量測不受外界影響。以固定溫度與時間對熱管施加熱量，溫度量測設備分別使用 K Type 熱電偶量測高溫，觀察高溫液態金屬熱管表面溫度分布情形，並透過數據採集儀將量測數據送至電腦彙整。耐熱裝置為包覆實驗平台高溫熱管實驗部分，內部放置耐高溫隔熱棉材，同時確保內部溫度不受外界影響及防止高溫熱管作動過程中因爆裂產生的問題等，待測熱管取 6 個溫度量測點，每個點相隔 60 mm 如下圖 8 所示。

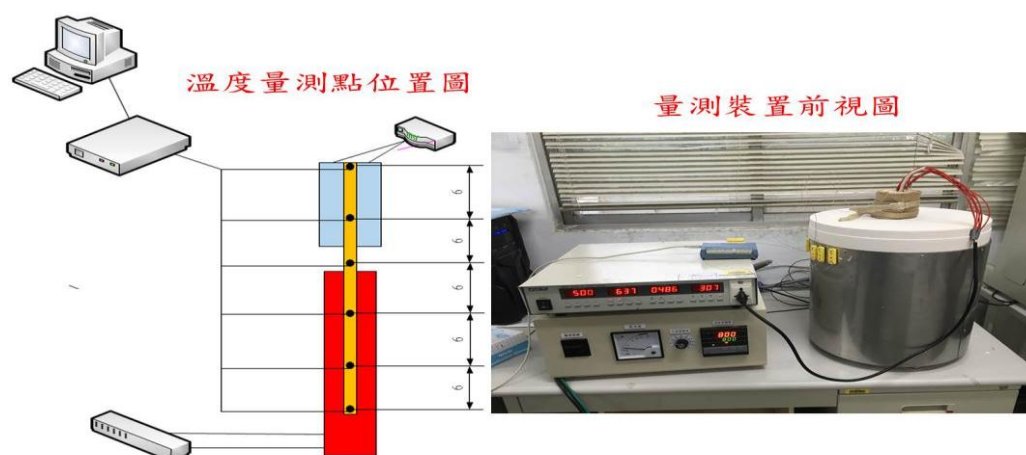


圖 8. 熱管性能測試平台示意、裝置前視圖與實際量測位置圖

四、實驗方法與分析

採單管束實驗，從無毛細結構之熱虹吸式（Thermosyphon）熱管充填實驗做起，其作動原理及方式，如圖 9.所示。當蒸發端受熱後，蒸發端內部之工作流體被加熱產生相變化由液態產生汽態，蒸發產生蒸汽流由蒸發端汽化至冷凝端。當冷凝端放熱後，使工作流體冷凝由

汽態轉變為液態，並藉由重力或毛細作用力迫使工作流體回流至蒸發端完成此一工作循環。圖 10 為具有溝槽及鋼網之複合式毛細結構，熱管作動方式示意圖。

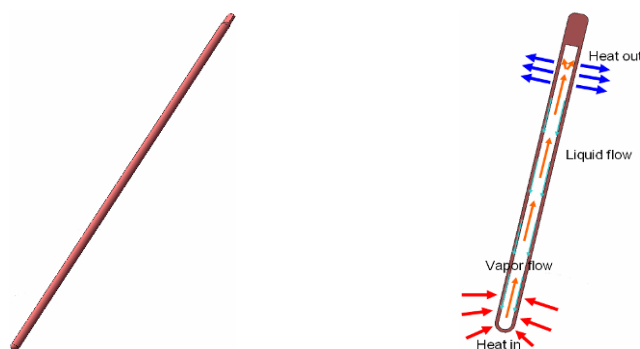


圖 9. Thermosyphon 熱管作動方式示意圖

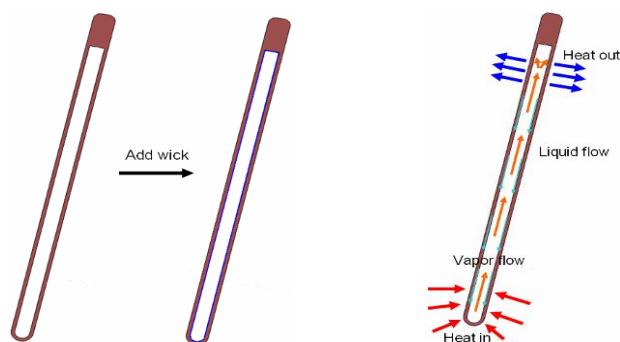


圖 10. 複合式毛細結構熱管作動方式示意圖

(一) 高溫熱管垂直傳熱測試結果

高溫熱管以充填 1 g、0.9 g 與 1.3 g 的金屬鈉以自然空冷與強制冷卻條件，在加熱器輸入固定溫度下、改變蒸發端長度與冷凝端溫度，來進行測試。

高溫熱管以充填 1g 的金屬鈉為工作流體和自然空冷條件，更改蒸發端長度(100 mm、150 mm、200 mm、250 mm)，在調整蒸發端長度之

後，可以發現到金屬鈉的蒸發現象。在蒸發端長度為 100 mm 時，金屬鈉則無法汽化。在蒸發端長度為 250 mm 時，冷凝端和蒸發端溫差最小。由圖 12 可觀察到，在 4000 秒時，發現金屬鈉有汽化的現象，channel 1 和 channel 2 在 600 °C 時，channel 4 有急遽上升的趨勢，與蒸發端溫度接近，則 channel 5 溫度則有明顯的升高，但是 channel 6 溫度沒有明顯上升現象。channel 1 與 channel 6 溫差 650 °C 。

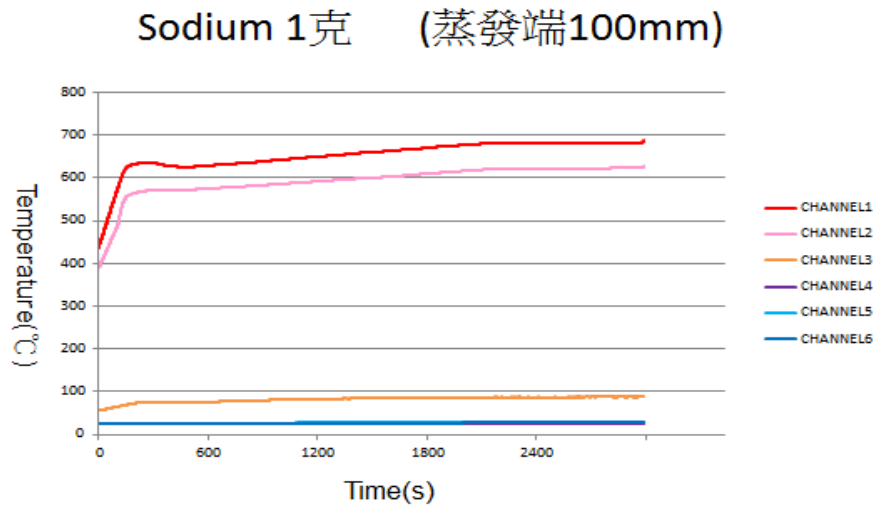


圖 11.蒸發端 100 mm 溫度與時間關係圖

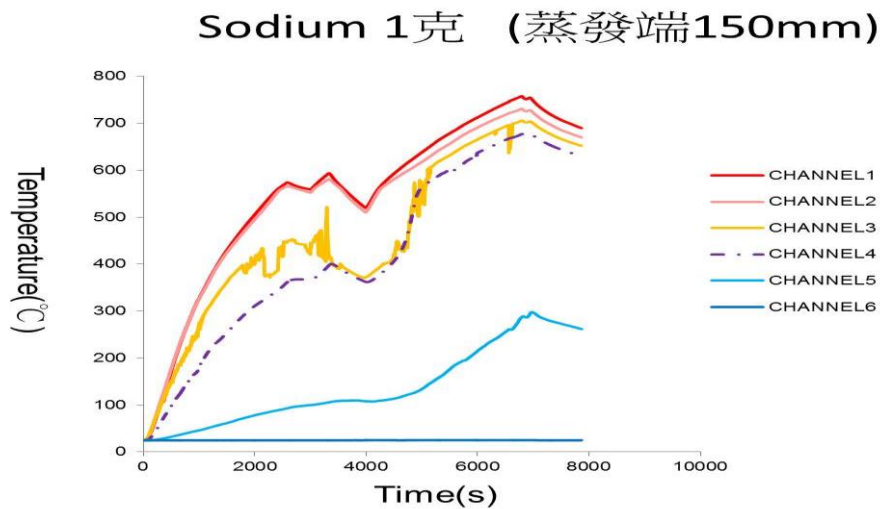


圖 12.蒸發端 150 mm 溫度與時間關係圖

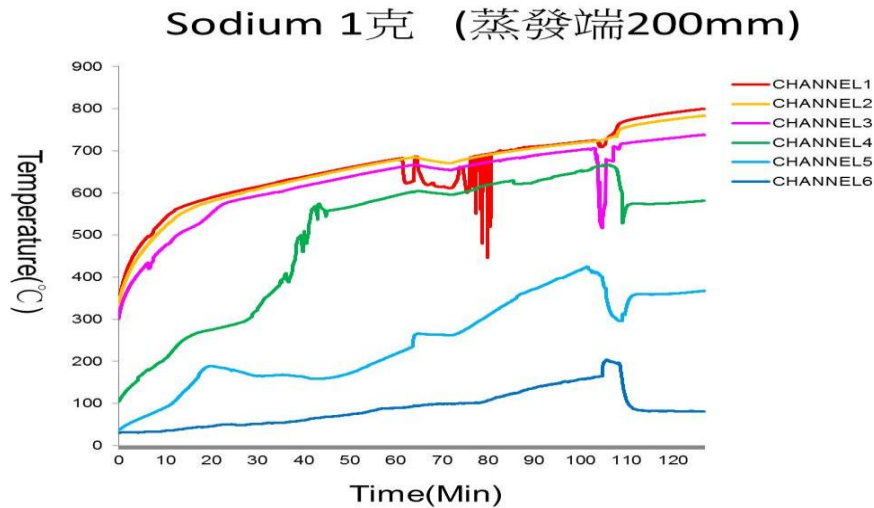


圖 13.蒸發端 200 mm 溫度與時間關係圖

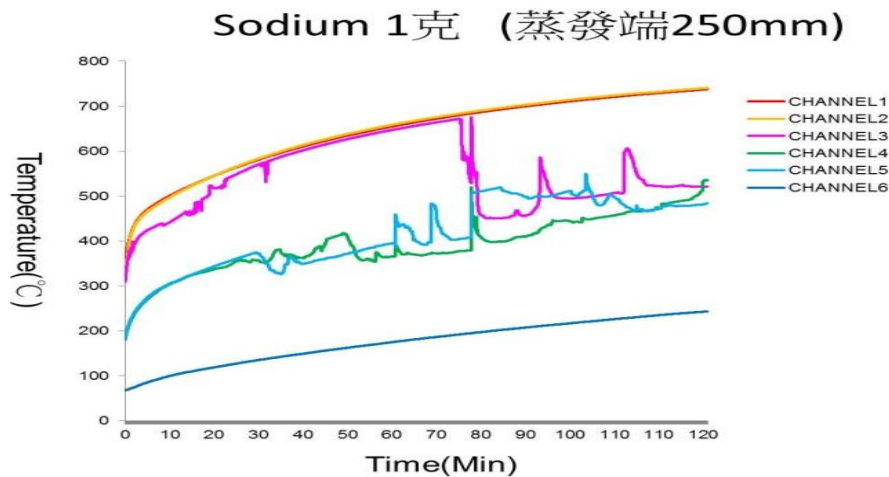


圖 14.蒸發端 250 mm 溫度與時間關係圖

(二)高溫穿線熱管垂直傳熱測試結果

高溫熱管以充填 1.3 g 的金屬鈉為工作流體和以固定瓦數方式冷卻，由圖 15.可觀察出，在 5000–7200S，發生鈉汽化現象，channel 1 與 channel 2 在超過 700 °C 時，channel 4、channel 5 和 channel 6 發生急遽上升現象，在 21600 S 時 channel 1 與 channel 6 溫差約 460 °C。

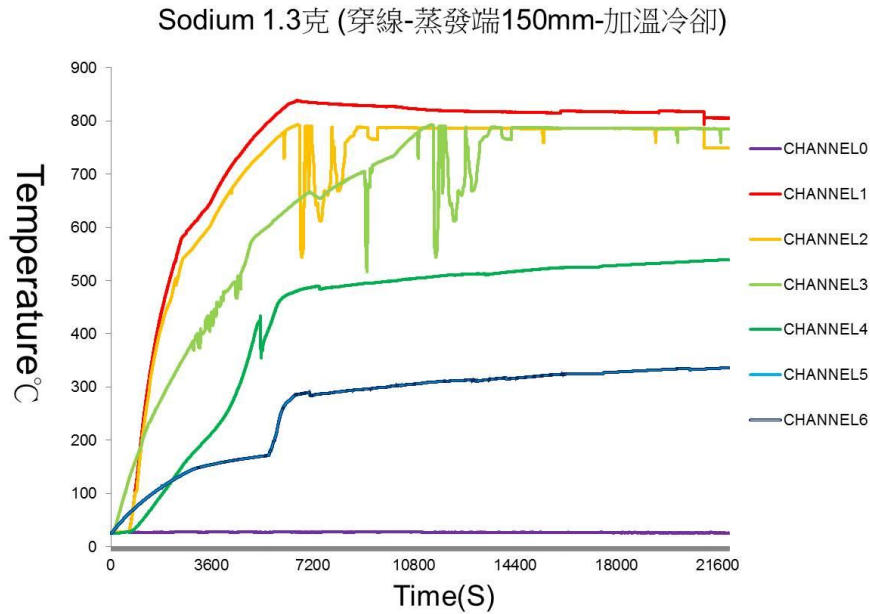


圖 15. 1.3 克 穿線熱管蒸發端 150 mm 溫度與時間關係圖

參、主要發現與結論

本研究成功利用金屬鈉製造 300 mm 長之高溫熱管，並進行性能測試，實驗結果如下：

1. 在充填高溫熱管中，觀察到不鏽鋼管聚合性不好，當進行抽氣壓合的動作時，發現持續進行壓合可保持真空度，若直接放開可能會造成真空洩漏，導致熱管失效，所以修改製程為機器不放開熱管直接焊接。
2. 量測高溫熱管時，發現金屬鈉不容易回流到蒸發端，造成液態金屬鈉液體無法回流到蒸發端導致 dry out，我們將會更改適合的毛細結構，使工作流體容易回流。
3. 熱管為中空金屬，重量將跟同體積的不鏽鋼管輕得多，傳輸速度也較不鏽鋼管快上許多，相對成本較不鏽鋼管來的便宜。

肆、參考文獻

- [1] 邵承矩, 1987, “能源應用,” 東華書局。
- [2] Source: Sandia National Laboratories, operated for the United States Department of Energy by Sandia Corporation.
- [3] James Moreno, Scott Rawlinson., “Dish/Stirling Hybrid-Heat-Pipe-Receiver Design and Test Results,” 37th International Energy Conversion Engineering Conference, 2002
- [4] Royal Society of Chemistry. Visual Elements: Group 1 – The Alkali Metals. Visual Elements. Royal Society of Chemistry. 13 January 2012.
- [5] Source: <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/材料安全性數據表>
- [6] Byoung In Lee, Sung Hong Lee, “Manufacturing and Temperature Measurements of a Sodium Heat Pipe”, KSME International Journal. Vol. 15 No. 11, pp. 1533-154, 2001.
- [7] Kara L Walker, Calin Tarau, William G Anderson, “High Temperature Heat Pipes for Space Fission Power”, 11th International Energy Conversion Engineering Conference, 2013.
- [8] 趙蔚琳, 庄駿, 1994, “碱金属热管轴向传热极限的研究”, 《南京工业大学学报: 自然科学版》1994年 第 S1 期 111-114 页。
- [9] 于萍, 张红, 许辉, 沈妍, 2015, “高温钠热管再启动特性研究”, 《中国电机工程学报》。
- [10] Peter Meisel, Matthias Jobst, Wolfgang Lippmann, Antonio Hurtado, “Design and manufacture of ceramic heat pipes for high temperature applications” Applied Thermal Engineering, 2015.
- [11] John H. Rosenfeld, Ivan E. Locci, James L Sanzi, David R. Hull and

Steven M Geng , “Post-Test Analysis of a 10-Year Sodium Heat Pipe Life Test”, cosponsored by the ANS and Technology Division, the ANS Trinity Section, and the American Institute of Aeronautics and Astronautics Albuquerque, New Mexico, February 7–10, 2011.

[12] Module. James Martin, Omar Mireles ,Robert Reid, “Multiple Restart Testing of a Stainless Steel Sodium Heat Pipe”, 2006.

[12] Source: <http://www.thermacore.com/>

[13] Thomas Mancini, Peter Heller, Barry Butler, etc., Dish-Stirling Systems : An Overview of Development and Status, Journal of Solar Energy Engineering, 125, PP. 135-151, 2003.