輻射狀型震盪式熱管之設計與研製

Radial-type Pulsating Heat Pipe Design and Fabrication

陳育堂[1]　　蔡聲鴻[2]　　謝宏榮[3*]

Yu-Tang Chen　　Sheng-Hong Tsai　　Hung-Jung Shei

[1]德霖技術學院機械系副教授

[2]聖約翰科技大學機械與電腦輔助工程系副教授

[3*]中華科技大學機械工程系副教授

[1]De Lin Institute of Technology

[2]St. John's University

[3*]China University of Science and Technology

摘要

本研究製造不同長度與彎管數之新型態輻射狀型震盪式熱管並完成熱性能之測試與分析；輻射狀型震盪式熱管（Radial-type pulsating heat pipe）簡稱 RPHP。製作 RPHP 過程中，除了做一流場可視化觀察內部流動情形外，並加入了不同設計參數如管材有銅棒與銅管（管徑 3 mm、內徑 2.5 mm）、輻射數量（8、10、12）與輻射長度（50mm、100mm、150mm）混合搭配作為變化參數，以純水工作流體為，充填率為 40%、50%、60%，加熱功率有 10W、20W、30W、40W、50W、60W，利用實心與充填後之 RPHP 比較其傳熱性能。RPHP 的蒸發端由中央底部 40 mm 之正方形銅板受熱，冷凝端部分使用強制風冷將熱源排出。實驗結果顯示，其中以輻射長度 150 mm 與輻射數量 12 個、充填率 60%，因液、汽柱頻繁的震盪循環，而溫度大幅降低，因此有較好的散熱效果。

關鍵字：輻射狀、震盪式熱管、流場可視化、強制風冷、散熱

Abstract

In this paper, in order to create a number of different length and bend the new type of Radial-type pulsating heat pipe and to analyze its effectiveness; "RPHP" is the abbreviation of Radial-type pulsating heat pipe.

The production process of RPHP, in addition to do flow visualization to observe the situation, but also joined the different design parameters such as copper pipe and brass pipe (external diameter = 3 mm, internal diameter = 2.5 mm), the number of radiation (8, 10, 12) and radiation length (50mm, 100mm, 150mm) as a change in mix and match parameters, the working fluid is pure water, filling rate are 40%, 50%, 60%, and use the different heating power (10W, 20W, 30W, 40W, 50W, 60W) compared with solid and filling the heat transfer performance of RPHP. The evaporation side of RPHP are heated

by the square copper of the central bottom 40 mm , and the condensation side use the forced air cooling for heat dissipation. Experimental results show, that the radiation length 150 mm and radiation number of 12, filling rate of 60%, due to liquid and vapor bubble pulsating cycle frequency, and significantly lower temperature, it is better heat dissipation.

Keywords: Radial-type, Pulsating Heat Pipe, Flow Visualization, Forced Air Cooling, Heat Dissipation

一、前言

隨著雲端科技與奈米科技的發展，使得儲存能力與運算能力越來越強大，連帶地散熱元件之性能也越重要，儲存設備、CPU或圖型處理電晶體所帶來之高溫影響，對筆記型電腦(Notebook, NB)與相關電腦元件之性能[1]，甚至壽命將大幅降低。因此，如何降低上述元件所帶來之高溫，為發展雲端科技、NB產業或是LCD 相關產業最重要之問題之一。而近年來的電子散熱模組主要是由熱管(Heat Pipe)、鰭片(Fin)與風扇(Fan)等結合而成；其中熱管是當前最常使用來解決散熱問題的工具，係利用熱管內工作流體產生相變化(Phase Change)來吸收大量的潛熱，而管壁的毛細結構使熱管不受重力的影響，因此在任何環境下皆可使用。而震盪式熱管(Pulsating Heat Pipe, PHP)是近幾年來所提出的新型熱管，具有結構簡單、傳熱迅速、傳熱量大等優點，與傳統熱管的差異在於不受傳統熱管的限制，所以運用範圍較有伸展空間。

近些年來在電子散熱方面，只有鰭片與風扇結合的散熱模組已漸漸不符合散熱之要求；因此發展出將熱管嵌入鰭片中變成一組合式的散熱模組。由於熱管內的工作液體藉由相變化（Phase change）傳輸熱量，其熱傳導性能為5,000 ~ 30,000（W/m・K） 遠超過鋁（237 W/m・K）、銅（386 W/m・K）、金（317 W/m・K）、銀（417 W/m・K）等金屬材料之熱傳導係數（Thermal conductivity）[2] ，因此可得到極高的熱傳導係數進而達到快速將熱帶走的效果。而震盪式熱管（Pulsating Heat Pipe, PHP）與傳統熱管（Heat Pipe）的差異在於沒有像傳統熱管的限制那麼多，所以運用範圍可以較有伸展的空間，因此本研究的"新型態的震盪式熱管"中，期待能在散熱裝置方面有更新的領悟與創新。

最先發現熱管原理與指出熱管（Heat pipe）名詞是在1944年由Gaugler [3] 申請的專利中設計「在內部有毛細管構造的密閉管狀容器，外部有吸熱用的金屬片，管的一端加熱，一端在冰水中冷卻，以冷卻容器內的蒸汽。」之裝置，此文獻提出熱管充分運用熱傳導原理與液體快速熱傳遞性質，內部工作流體藉由相變化吸收潛熱，形成前後兩端之溫差，達到傳輸大量熱能之目的，此為有關熱管的第一篇文獻。

1964年Suo and Griffith [4] 在研究中指出毛細管內兩相流體在水平擺設中，當汽泡達一定長度時汽泡與毛細管內管壁之間會有一層液態膜（Liquid Film），使管內液體成塊狀液體（Liquid Plug），隨後形成氣體與液體分離的狀態，並稱

此狀態為毛細塊狀流（capillary slug flow）。

1990年，Akachi [5] 提出專利，本篇為第一次提出震盪式熱管名詞之相關文獻，公開24種不同類型的迴路式熱管（Loop Type Heat Pipe），其基本觀念近似PHP，在管路中至少有一個逆止閥來控制流向（使其產生震盪作用），這些迴路式熱管，預期為用來克服對流式熱管缺點，輸入熱量從312W至928W，充填之工作流體為水（H2O）時，熱阻值範圍由0.233 ℃/W至0.082 ℃/W，充填之工作流體為一氟三氯甲烷（Freon-11）時，熱阻值範圍由0.189 ℃/W至0.077 ℃/W，Freon-11具有較佳性能，並在文中提出最佳流體應該具有低黏滯係數與較大之飽和壓力梯度之特性。

1993年，Akachi [6] 將迴路式熱管分為開放式與封閉式迴路兩種，使用1 mm外徑與0.7 mm內徑之金屬管製造，充填之工作流體採用HFC-142b，加熱量由5W至90W，較好效果之充填量為30%至50%，其熱阻值範圍從0.64℃/W 至1.04℃/W 。

1996年，Akachi [7] 正式提出「Pulsating Heat Pipe」之名稱，文章中介紹震盪式熱管散熱概念，本體是由金屬毛細管以彎曲方式所組成，管內流場散佈著有液柱與氣柱，其傳熱機制為液－汽兩相變化系統形成的震盪作用，此為一種熱驅動壓力產生震盪之裝置。管內無需使用毛細結構即可使工作流體由冷凝段回流到蒸發段，為一種自保持性之熱驅動壓力震盪裝置。

1999年，Nagata [8]等人提出實驗工作流體為水、乙醇及R－141b。文中指出汽泡驅動熱輸送管之熱傳導係數比銅高出1000倍。在相同管徑下，熱傳輸效率比對流效應式熱管高出許多。經過實驗後發現，工作流體熱阻形成影響熱傳輸效率的重要因素。

2003年，林益邦 [9] 採用外徑3mm內徑2.4mm無氧銅管做單迴路與多迴路之脈衝式熱管，工作流體選用超純水與乙醇比較，測試方式有水平與垂直兩種操作模式，本論文中最佳實驗為多迴路式於垂直操作模式下充填率50%為最佳效能，最低熱阻為0.29℃/W ，實驗結束後提出證明PHP可作動之充填率在40%至80%之間。

2006年，陳慧倫 [10] 使用純水、銀奈米流體（100 ppm、450 ppm）填充於管內徑2.4mm、外徑3mm之銅管製震盪式熱管中，填充比有20%、40%、60%、80%，在實驗後之總結為充填率在40%、60%間效果較好。使用最佳的填充比60%，充填銀奈米流體100 ppm 比充填純水低7.79℃。

2007 年，淡江大學吳宗祐[11]利用聚二甲基矽氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)為管路材質，製作出長、寬及流道內徑各為 56 mm、50 mm 以及 2 mm 的可視化震盪式熱管，在填充率 60 %下，輸入 3 W、4 W、5 W、6 W、7 W、8 W 測其性能。並利用高速攝影機拍攝內部工作流體作動情形，加以分析討論。

2007 年，Yang[12]等人探討封閉迴路是震盪式熱管的運作限制，利用不同管徑、充填率、熱通量和熱源位置來比較散熱功率。結果顯示，當充填率為 50 % 內徑為 2 mm、熱源在下方且垂直擺放時有最佳之熱負載效果。隔年，Lin[13]等人將奈米流體(100 ppm、450 ppm)作為工作流體，充填於內徑 2.4 mm 之銅管中，

比較充填率為 20%、40%、60%、80%時之散熱效果。當充填率為 60%時，充填奈米流體(100 ppm)的工作溫度比充填純水時低了 7.79 °C 且熱阻值為 0.092 °C。

Qu[14]等人曾利用數學模組的方式探討震盪式熱管內汽泡成核過程與表面粗糙度、管徑、工作流體的關係，結果顯示管內表面粗糙度越大且管徑越小則震盪式熱管的啟動溫度相對較低，在工作流體方面，水的散熱瓦數較酒精、丙酮高出許多。Khandekar[15]等人也提出用數學方程式來模擬單迴路震盪式熱管。他們利用經驗與公式推導質量流率為單方向且均勻流場時熱阻值的解，藉此建立震盪式熱管的數學模組，作為往後工程的應用。2008 年，林玉興[16]也利用 10 根外徑 3 mm、內徑 2.45 mm 的玻璃管及 U 型銅毛細彎管製作半可視化模組，並測其性能。

2009 年，淡江大學陳冠廷[17]製作不鏽鋼及玻璃震盪式熱管，不鏽鋼管採用內徑 3 mm、外徑 3.5 mm的管材，玻璃管為外徑 6 mm、內徑 3 mm，研究在不同的風速下，測其性能並利用類神經網路預測其性質。2009 年，Maydanik等[18]提出一組新型式震盪式熱管散熱模組，其PHP模組是由外徑 2.0 mm、內徑 1.2 mm 的銅毛細管所組成，包含 17 個折彎數。鰭片裝置總面積為 1670 cm^2，加熱面積為 40 × 35 mm，風扇的尺寸為 105 × 100 × 60 mm。利用水、甲醇、R141b做為工作流體，在同一熱源加熱，其加熱範圍為 5W~250 W，發現在 250W時水和甲醇最小熱阻一致為 0.32 °C/W，熱通量為 17.8 W/cm^2，加熱面積固定在 1 cm^2 加熱至 125 W，此時甲醇最小熱阻為 0.62 °C/W。

2010 年，詹前軒[19]使用外徑 6 mm，內徑 3 mm 之玻璃管製作總長 1980 mm 之可視化震盪式熱管。冷凝段溫度控制在 35 °C，利用數位攝影機拍攝影片，並在熱管中加入保麗龍球，以便觀察流體流動之方向與循環週期。另在不同工作流體填充率、傾斜角度及加熱功率下評估整體熱阻值，結果顯示加熱功率 200 W，填充率 70 %和傾斜角度 45 °時，可得所有實驗中之最低熱阻值 0.164 °C/W。

2010 年，Senthilkumar[20]等，利用田口法規劃實驗分析熱管之熱性能最佳參數，其採用加熱功率、傾斜角與冷卻水之流率為 3 個控制因子，以L_9直交表規劃實驗並計算各輸出品質得S/N，再利用變異數分析，分別獲得最佳效率、最佳熱阻與最佳熱傳導係數。

2011 年 Wilson[21]等，分別以以丙酮和水為開迴路與閉迴路震盪式熱管之工作流體進行實驗研究與可視化觀察。其結果顯示在 50%充填率下，丙酮具有較佳的低功率效能，而水則具有較高功率的執行效能。同年 Qu[22]等製作完成水利直徑 352μm 之梯形截面微型矽基震盪式熱管並分別充填 FC-72，R113 為工作流體，進行探論重力、充填率、與工作流體對微型矽基震盪式熱管之熱性能影響。實驗結果顯示，當傾斜角大於 10°，且填充率為 30%~65%時，微熱管可震盪運轉，且熱傳效果有顯著的增加。另在 FC-72 與 R113 不同工作流體下之最佳充填率，分別為 55%與 41%，且此時之熱阻值下降 56.5%與 59.7%（8.5W 加熱功率）

2012年 Narasimha等[23]，分別以丙酮、水、甲醇、乙醇為工作流體在不同輸入功率下進行震盪式熱管性能分析；且利用功率頻譜密度分析熱管之震盪週

期。實驗結果顯示，以丙酮為工作流體之震盪式熱管具有較低之熱阻值與較高之熱傳導係數，且蒸發端與冷凝端之溫差最小，震盪循環週期最小(頻率大)。

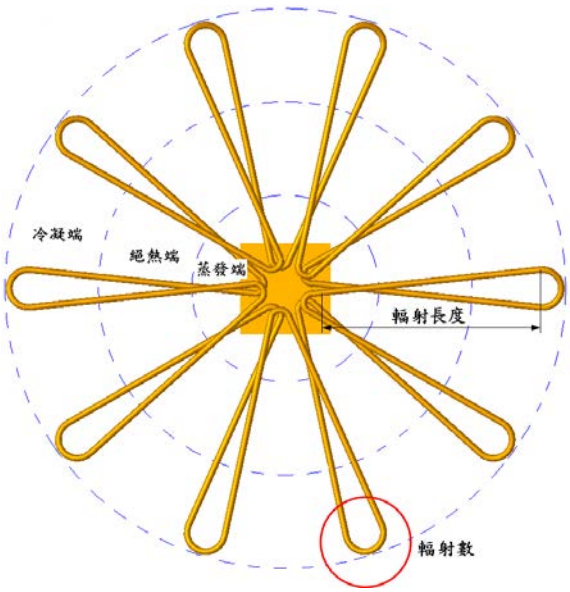
為應高瓦數電子元件的應用，本研究設計一款可視化之新型輻射狀型震盪式熱管，搭配各種參數，找出其最佳之熱傳性能，期能藉以探討最佳的設計方向與散熱效能，並建立發展高效能震盪式熱管最佳化之機制，以實現本研究之價值。

二、RPHP 設計與製作

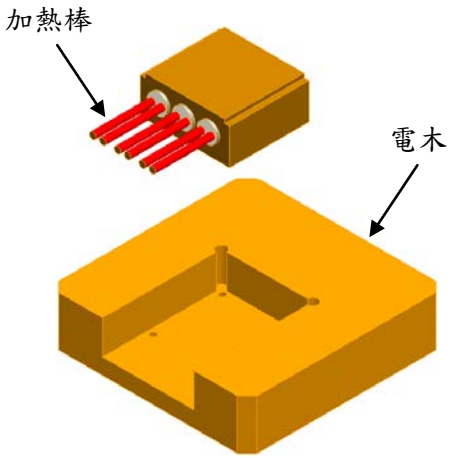
本研究之輻射狀型震盪式熱管，是以一根細長紅銅管（內徑2.5 mm × 外徑3 mm × 長度2000 mm）利用一般熱管之彎管機將銅管作數次折彎，再依本研究所設計之輻射狀將折彎後將管路作重疊並圍成一圈，另外將方形銅板用錫焊來焊接固定於輻射狀中央作為發熱源處，再以紅銅管內徑1 mm 外徑2 mm之細管作為充填管，並以中央為內圈做蒸發端，外圈為冷凝端，其形狀如圖一所示。以下為何本設計之考量因素：

1. 管路重疊：運用彎管機將銅管折彎再以雙層方式重疊，管路折彎處變多、管路數目也增加，效果較佳。
2. 蒸發端：在輻射狀中央為蒸發端部分，熱源輸入是另外由加熱棒（60V / 150W）置入銅塊內固定於電木上之加熱裝置（如圖二 ），再由電源供應器輸入加熱功率，而銅板與銅塊之間的貼附將加入導熱膏均勻塗抹於銅塊上減少中間的縫隙，讓銅片與銅塊間緊密貼合使實驗準確性提高。
3. 絕熱端：絕熱設計是為了降低冷凝與蒸發兩端中間傳輸所損失的熱量，由於效果影響不大，因此絕熱部分可有可無；本實驗有架設風洞系統的內罩，讓風導向冷凝端，而不會影響絕熱端與蒸發端。
4. 冷凝端：輻射狀型之外圈即為冷凝端，此設計將管路分散在外圈部分，把管與管之間的距離加大，使管與管之間不會因彼此的熱源影響到冷凝端冷卻效果。
5. 中央銅片：中央銅片尺寸為長40 mm、寬40 mm、厚度2 mm作模擬熱源處；在厚度方面考慮過選擇1 mm或2 mm，經由實驗測試，由於1 mm太薄導致形成只有垂直傳熱，因此無法做好儲熱，熱源很快的就散掉，對於測試效果較不穩定，而2 mm開始有橫向傳熱，在做測試實驗時，顯得比較穩定。

可視化部份，如圖三所示，由於玻璃熱傳導性差，考量RPHP之正常運作，採用2個玻璃彎管，則因其它管路之溫差產生震盪推動工作流體將不會因玻璃熱傳導速率較慢而導致無法形成蒸發端與冷凝端之溫差進而影響整體RPHP作動，如此便可順利可觀察運作時工作流體、氣泡變化於RPHP管內之流動情形。



圖一 RPHP 示意圖



圖二 加熱裝置圖

圖三 RPHP 部分可視化圖

三、實驗測試

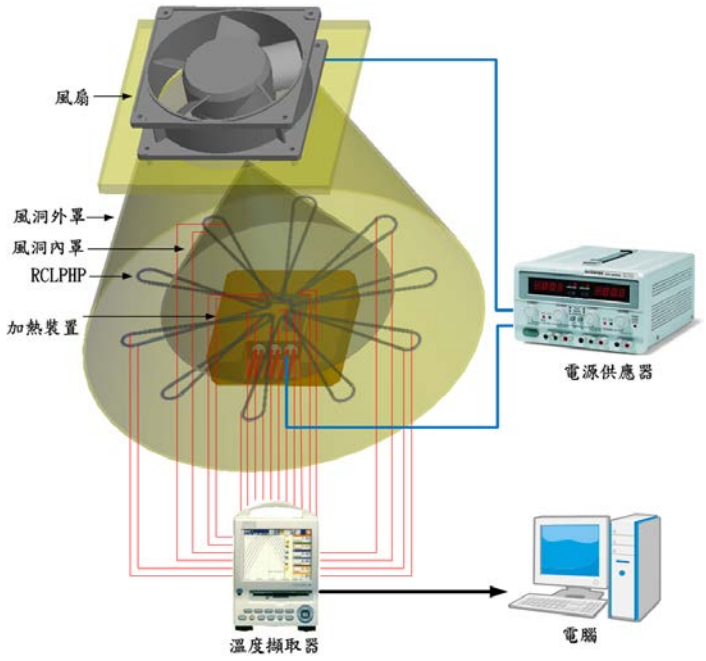
3-1 實驗參數

震盪式熱管會因實驗參數的不同而影響整個PHP所展現的效能，因此在新型的RPHP上，設計了以下參數，並觀察這些參數於何種搭配才會顯示出最佳的效能，RPHP輻射長度、輻射數說明於圖一，設計參數如下所示：

1. 管材：紅銅管：外徑3 mm、內徑2.5 mm
   紅銅棒：外徑3 mm
2. 輻射長度（L）：50 mm、100 mm、150 mm
3. 輻射數量（N）：8、10、12
4. 充填比率（FR）：40%、50%、60%
5. 加熱功率（W）：10W、20W、30W、40W、50W、60W

3-2 實驗模組架設

RPHP實驗整體架設示意圖如圖四所示，本實驗自行設計之風洞系統包含風扇、風洞外罩、風洞內罩，利用外罩將風導向冷凝端、內罩防止風吹向蒸發端，而風扇與加熱裝置所需電源由電源供應器調整輸出功率；RPHP接至溫度擷取器之線段皆為熱電偶貼附點，位置為發熱源1點、風溫1點、冷凝端2點、蒸發端2點，風扇吹至RPHP平均風速為1.5 m/s，溫度擷取器箭頭表示數據資料傳輸至電腦，再由電腦轉成數據資料檔案以便於觀察並分析實驗中之溫度變化。



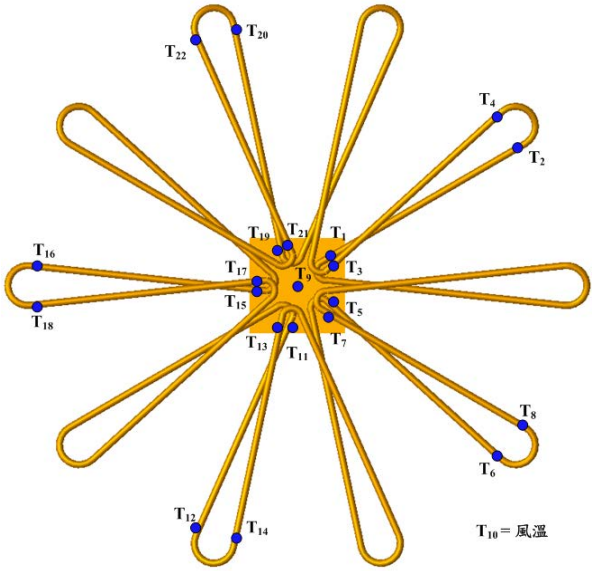
圖四 RPHP 實驗架設示意圖

3-3 實驗步驟

實驗測試之步驟如下：

1. 將RPHP外表產生的銅鏽用菜瓜布刷掉，並清洗後用乾布拭乾，銅鏽的附著若不清除，在實驗中會使鋁箔膠帶無法緊貼銅管上，而在實驗時若有銅鏽會形成熱傳導的一個阻力，讓實驗產生誤差。
2. 將兩台溫度擷取機的熱電偶貼附在欲量測之銅管點上，實驗中熱電偶貼附點如圖五所示。蒸發端溫度為T_1、T_3、T_5、T_7、T_{11}、T_{13}、T_{15}、T_{17}、T_{19}、T_{21}點，冷凝端溫度為T_2、T_4、T_6、T_8、T_{12}、T_{14}、T_{16}、T_{18}、T_{20}、T_{22}點，中央方形銅片發熱源溫度為T_9點，風溫為T_{10}點。
3. 將導熱膏平均塗抹於加熱銅塊上，再將RPHP銅板對準加熱裝置後放置。
4. 放上風洞系統之內罩，再放置外罩，將電源供應器調至10W增加銅塊溫度，將連接風扇的電源供應器調整至12 V / 0.6 A後便開始測試。
5. 由於10 W時溫度變化較慢，因此測試時間為90分鐘，時間結束後將溫度擷取器之記憶卡取出，傳輸至電腦轉數據資料檔便於觀察與分析，存檔後將記憶卡數據刪除，續做下個加熱功率。

6. 其餘加熱功率20 W至60 W測試時間皆為60分鐘，間隔10 W每10秒儲存數據紀錄一次，將每個加熱功率作紀錄觀察。
7. 完成一組RPHP測試後，將鋁箔膠帶撕下解開熱電偶貼附。
8. 更換另一組不同參數之RPHP測試，重複步驟1至7步驟。



圖五 RPHP 熱電偶貼附位置圖

四、結果與討論

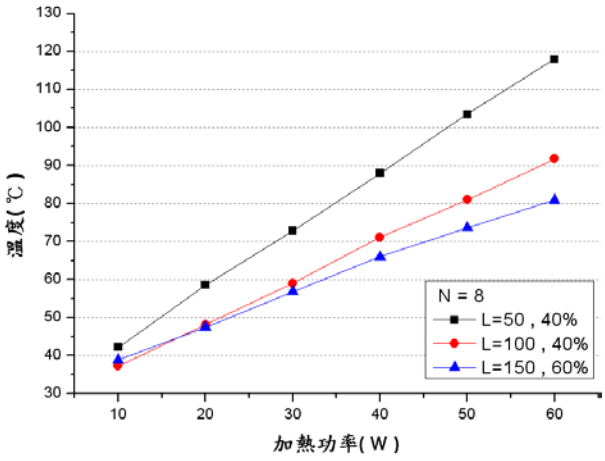
4-1 實驗結果

在相同輻射數下，於各種輻射長度在最佳充填率時，中央發熱源處溫度相互比較，如圖六、圖七、圖八所示；由於輻射長度50mm之蒸發端與冷凝端相隔距離太接近，因此不容易形成溫差，在低加熱功率中較難啟動震盪循環，所以中央發熱源處溫度較輻射長度100mm與150mm溫度高。

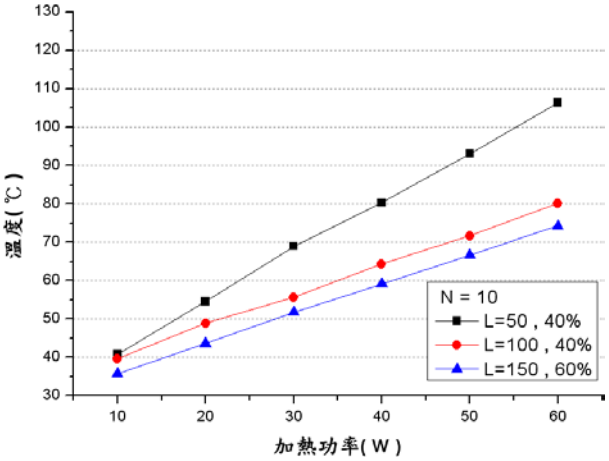
輻射數8個與各輻射數之最佳充填率中比較其發熱源溫度，在最高加熱功率60W時，輻射長度150 mm與50mm相差37.1℃，而輻射長度150mm與100 mm相差10.9℃；在輻射數10個與各輻射數之最佳充填率中比較其發熱源溫度，最高加熱功率60W時，輻射長度150mm與50mm相差32.1℃，而輻射長度150 mm與100mm相差5.9℃；在輻射數8個於各輻射數之最佳充填率中比較其發熱源溫度，最高加熱功率60W時，輻射長度150mm與50mm相差27.3℃，而輻射長度150mm與100mm相差9.4℃。

在相同輻射長度於各輻射數實驗後最佳充填率之中央發熱源處溫度互相比較下，發現隨著輻射數增加則各管路可減少平均所分擔的熱量，因此中央發熱源處溫度亦隨之下降。輻射長度50 mm於各種輻射數之最佳充填率中比較其發熱源溫度，在最高加熱功率60W時，輻射數12個比輻射數8個低25.7℃，而輻射數12個比輻射數10個低14.1℃；在輻射長度100mm於各種輻射數之最佳充填率中比較

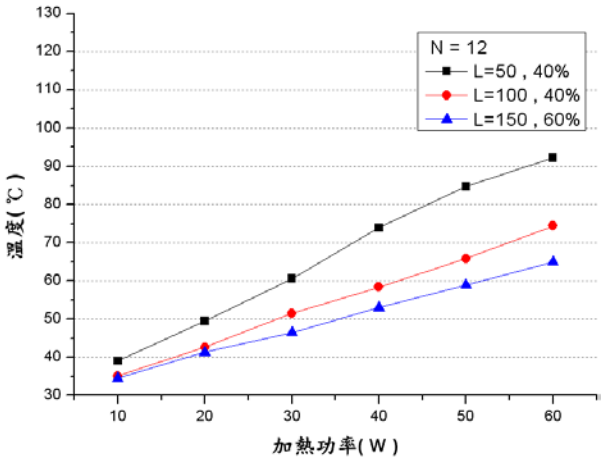
其發熱源溫度，輻射數12個比輻射數8個低17.4℃，而輻射數12個比輻射數10個低5.8℃；在輻射長度150mm於各種輻射數之最佳充填率中比較其發熱源溫度，輻射數12個比輻射數8個低15.9℃，而輻射數12個比輻射數10個低9.3℃。



圖六 N=8於各種輻射長度之最佳充填率發熱源與加熱功率關係



圖七 N=10於各種輻射長度最佳充填率發熱源與加熱功率關係



圖八 N=12於各種輻射長度最佳充填率發熱源與加熱功率關係

4-2 可視化觀察結果

加熱功率10W時，在調整完加熱功率後2分鐘時液柱便開始有移動情形，液柱較長且移動速度較慢，此時的汽泡在累積熱量，一旦達到某溫差時才會有震盪，汽彈推動速度會在瞬間加速傳遞熱量，在溫度下降後，又會恢復較慢的移動速度累積熱量；由於緩慢的移動速度而震盪過後累積熱量時間長，因此震盪循環次數較少，在大多數時間可發現液柱與中型汽彈僅在蒸發端與冷凝端左右徘徊。加熱功率20W時，在觀察期間發現，經常出現緩慢的架橋形成此情形僅在加熱功率20W時較常出現，且液柱大多數分裂成短型與中型汽彈，最初液柱分裂形成汽彈是在調整完加熱功率後16分鐘時發現。

在加熱功率30W時，液柱與加熱功率20W時不同，大多數以長型液柱、長型汽彈作移動，在調整完加熱功率後5分鐘出現加熱功率30W的首次震盪，液柱與汽彈移動速度變快，在首次震盪之後累積熱量時間縮短，移動速度較20W時稍快且頻繁的徘徊移動，震盪幅度加大，震盪循環次數也增多。加熱功率40W時，在長條型液柱前端分裂成許多蒸汽泡，而由蒸汽泡隨著氣柱帶動長型液柱做震盪循環，使震盪循環速度加快，短暫停滯與緩慢移動累積熱量情形減少，在過程中觀察到有多次形成架橋現象，但並無分裂成汽彈，而液柱的流動無視於架橋形成同樣持續的流動，最後架橋會隨著長型液柱流過後在尾端形成蒸汽泡。

在加熱功率50W時，震盪速度相當快，幾乎無停滯與緩慢移動累積熱量情形，調整完加熱功率後7分鐘便開始有逐漸震盪速度加快情形；觀察並擷取的此畫面時發現長型液柱減少，大多分裂成短型、中型汽彈與蒸汽泡存在，而長型的液柱都是瞬間震盪中流動走。加熱功率60W時，流場型態大部分為蒸汽泡帶動長型液柱，而長型液柱中間有架橋形成，但並無分裂形成汽彈，由於在高加熱功率下熱量累積迅速，因此形成持續性的震盪。

五、結論

本文研究新型態輻射狀型震盪式熱管並分析其效能。製作RPHP設計中加入輻射數量（8個、10個、12個）與輻射長度（50mm、100mm、150mm）混合搭配作為變化參數，工作流體為純水，充填率為40%、50%、60%，加熱功率有 10W、20W、30W、40W、50W、60W，利用銅棒與充填後之RPHP比較其散熱效果。在經過實驗後，做以下幾點來分析其結果重點：

1. 輻射數量：

經過實驗得知隨著輻射數量（管路數量）的增加，可大幅降低每支管路平均分擔的熱量，實驗中相同輻射長度下，輻射數量10與8比較發熱源溫度平均可減少約10℃，若增加輻射數量至12比較發熱源溫度平均又可減少約10℃。

2. 輻射長度：

因輻射長度增長，而蒸發端與冷凝端距離變遠，容易形成兩端之間的溫差，溫差越大會使PHP容易產生震盪循環，隨著震盪次數的增加，將熱量帶走的次數

亦增加，整體溫度可大幅下降。以相同輻射數比較發熱源溫度，輻射長度100mm與50mm比較下平均可低約23 ℃，而輻射長度150mm 與100mm比較下平均可再低約6℃。

3. 充填率：

本研究經充填率為40%、50%、60% 經實驗過後，綜合各充填率對於RPHP之效果敘述如下：

(1) 在充填率40% 時氣柱比例多於液柱，因此蒸汽泡自由度高，在最低加熱功率10W 就可以啟動震盪，而隨著加熱功率增加也加速了震盪循環的速率，速度增加、交換熱量亦增加，在輻射長度50mm與100mm於各種輻射數中，發熱源溫度皆低於充填率50%、60% 約1℃至5℃之間。

(2) 充填率50%，輻射長度為50mm與100mm時低加熱功率時發熱源溫度接近充填率60%，而高加熱功率溫度接近充填率40%約1℃；而在輻射長度150mm則相反，在低加熱功率發熱源溫度接近充填率40%，而高加熱功率溫度則接近充填率60%。

(3) 充填率60% 雖在最低加熱功率時難以啟動震盪，而且在輻射長度50mm、100mm中發熱源的溫度是3種填充率中最差的，但對於輻射長度150mm中，由於液柱比例多於氣柱，因蒸汽泡較少反而產生流體比例較多，而流道長度拉長後液柱傳遞熱量速度快於蒸汽泡傳遞，明顯在輻射長度150mm輻射數12加熱功率60W時發熱源溫度65℃，雖然熱阻不是最低，但發熱源溫度為最低。

4. 整體優劣性能比較：

以最高加熱功率60W比較下，輻射長度150mm輻射數12個充填率60%發熱源溫度65℃為所有參數中最低，比同樣參數之實心銅棒低47.7℃；則輻射長度50mm輻射數8個充填率60%發熱源溫度123.6℃為所有參數中最高，比同樣參數之實心銅棒低10.1℃；輻射長度150mm輻射數12個充填率60% 與輻射長度50mm輻射數8個充填率60% 之發熱源溫度相差58. 6℃，則輻射長度150 mm輻射數12個與50 mm輻射數8個兩者之實心銅棒發熱源溫度相差21℃。

六、參考文獻

1. http://www.hp.com.tw
2. 陳嘉瑞，陳宗耀，陳孟壕，王邦吉，蔡志然，高效能板式熱管之研發，國研科技第 15 期，pp.40-47 頁，2007
3. R.S.Gaugler, “Heat transfer device”, U.S. Patent 2,350,348, 1944
4. SuoO, Mikio and Griffith, Peter, “Two-Phase Flow in Capillary Tubes”, Transactions of the ASME, pp. 576-582, 1963
5. Akachi H., US Patent, Patent Number 4921041, 1990
6. Akachi H., US Patent, Patent Number 5490558, 1996
7. Akachi H., US Patent, Patent Number 5219020, 1993
8. S. Nagata, R. Shirakashi, S. Nishio, “Closed-Loop Heat-Transport Tube”，第 36 回日本傳熱演講論文集, pp. 675-676, 1999
9. 林益邦，脈衝式熱管之製造與測試，台北科技大學製造科技研究所碩士論文，2003
10. 陳慧倫，銀奈米流體應用於震盪式熱管效能之研究，淡江大學機械與機電工程學系研究所碩士論文，2006
11. 吳宗祐，「聚二甲基矽氧烷之震盪式熱管研製」，碩士論文，淡江大學機械與機電工程研究所，2007。
12. Honghai Yang, S. Khandekar and M. Groll, “Operational Limit of Closed Loop Pulsating Heat Pipes,” Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 49-59 (2007).
13. Yu-Hsing Lin, Shung-Wen Kang and Hui-Lun Chen, “Effect of Silver Nano-fluid on Pulsating Heat Pipe Thermal Performance,” Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1312-1317 (2008).
14. W. Qu and H. B. Ma, “Theoretical Analysis of Startup of a Pulsating Heat Pipe,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 2309-2316 (2007).
15. S. Khandekar and M. Groll, “Roadmap tp Realistic Modeling of Closed Loop Pulsating Heat Pipes,” Proc. 9th International Heat Pipe Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 26-38 (2008).
16. 林玉興，「震盪式熱管之製造與分析」，博士論文，淡江大學機械與機電工程研究所，2008。
17. 陳冠廷，「應用類神經網路預測震盪式熱管之熱性能」，碩士論文，淡江大學機械與機電工程研究所，2009。
18. Y. F. Maydanik, V. I. Dmitrin and V. G. Pastukhov, “Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe”, Applied Thermal Engineering, Vol.29, pp.3511-3517 (2009).
19. 詹前軒，「封閉迴路式震盪熱管之循環流研究」，碩士論文，淡江大學機械

與機電工程研究所，2010。
20. R. Senthilkumar, S. Vaidyanathan, B. Sivaraman, “Thermal Analysis of Heat Pipe Using Taguchi Method”, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol.2 (4), pp.564-569 (2101)
21. C. Wilson, B. Borgmeyer, R. A. Winholtz, H. B. Ma, D. Jacobson, D. Hussey, “ Thermal and Visual Observation of Water and Acetone Oscillating Heat Pipes”, Journal of Heat Transfer, Vol. 133, pp. 061502-1-061502-5(2011)
22. J. Qu, H. Wu, “Thermal Performance of micro Pulsating Heat Pipe”, Journal of CIESC, Vol. 62, No.11, pp.3045-3052 (2011)
23. K. Rama Narasimha, S.N. Sridhara, M.S. Rajagopal, K.N. Seetharamu, “Influence of Heat Input, Working Fluid and Evacuation Level on the Performance of Pulsating Heat Pipe”, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 2, pp. 33-42 (2012)