

輻射狀震盪式熱管之性能探討與分析

陳育堂

宏國德霖科技大學機械系

摘要

本研究製造出不同長度與彎管數新型態輻射狀型震盪式熱管並分析其效能；輻射狀型震盪式熱管 (Radial-type closed loop pulsating heat pipe) 簡稱 RCLPHP。以銅管 (管徑 3 mm、內徑 2.5 mm) 為製作 RCLPHP 的主要材料，田口法設計參數有輻射數量 (8、10、12) 與輻射長度 (50mm、100mm、150mm) 混合搭配作為變化參數，工作流體為純水，充填率為 40%、50%、60%，加熱功率有 20W、40W、60W。RCLPHP 的蒸發端由中央底部 40 mm 之正方形銅板受熱，冷凝端部分則利用強制空冷方式將熱排出。實驗結果顯示，其中以輻射長度 150 mm 與輻射數量 12、充填率 60%、加熱功率為 60W 時，具有較好的散熱效果，其原因為液、汽柱頻繁的震盪循環，而造成溫度大幅降低所形成。另本研究將利用田口方法進行實驗規劃與品質分析，並利用信號雜訊比(S/N)進行各項控制因子與水準之探討，進而分析得到最適化組合來跟實驗做比較。

關鍵字：輻射狀、震盪式熱管、田口方法

Performance Analysis and Study of Radial-type Closed Loop Pulsating Heat Pipe

Yu-Tang Chen

Department of Mechanical Engineering, Hungkuo Delin University of Technology

Abstract

In this paper, in order to create a number of different length and bend the new type of Radial-type closed loop pulsating heat pipe and to analyze its effectiveness. "RCLPHP" is the abbreviation of Radial-type closed loop pulsating heat pipe. With brass pipe (external diameter:3 mm, internal diameter:2.5 mm) for the production of RCLPHP main material, Taguchi method of design parameters of radiation quantity (8,10,12) and radiation lengths (50mm, 100mm, 150mm) to mix and match as the parameter changes, the working fluid is water, the filling rate of 40%, 50%, 60%, heating power with 20W, 40W, 60W. The evaporation side of RCLPHP was heated by the square copper of the central bottom 40 mm, and the condensation side used the forced air cooling for heat dissipation. Experimental results show that, with the length of 150 mm and the number of the radiation of radiation 12, the filling rate of 60%, and 60W heating power with, with a good cooling effect, the reason for the liquid and vapor column frequent shock cycle, resulting in significantly reducing the temperature of the formation. Another of the study will use the Taguchi method of experimental planning and quality analysis, and utilization of various control factors and levels of signal to noise ratio (S/N) carried out further analysis to obtain the optimal combination of comparison with experiment.

Keyword: Radial-type, Pulsating Heat Pipe, Taguchi Method

壹、前言

隨著電子產業的發展、奈米技術的進步，很多相關的電子零件與產品都朝向精緻型發展，要求美觀、輕便、小型化、功能也越來越多元化。由於功能強大伴隨著運行時所產生的熱源也相對的提高，若在運作時無法將熱即時的排出，電子產品的效能與運作都會出現當機或者短路等問題，所以電子產業上在散熱方面的問題也必須隨著而進步。

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 $5,000 \sim 30,000$ （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）[1]，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。

最先發現熱管原理與指出熱管（Heat pipe）名詞是在1944年由Gaugler [2] 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。近幾年來，熱管的一個相對較新類型的特徵在於優良的熱性能[3]，也適合於小型化

2005年，陳慧倫 [4] 使用純水、銀奈米流體（100 ppm、450 ppm）填充於管內徑2.4 mm、外徑3 mm之銅管製震盪式熱管中，其填充比有20%、40%、60%、80%，實驗結果發現充填率在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比純水溫度降低了 7.79 °C。

2010年，Cheng等[5]進行了調查，發現了56 nm Al₂O₃粒子的效果，在震盪式熱管具有高效能的熱傳輸能力，因此將Al₂O₃顆粒作為增強傳熱的一個重要參數。

在震盪式熱管研究中，實驗過程及實驗數據整理往往需耗費許多時間與金錢。故本研究利用田口方法進行實驗規劃與品質分析，並利用信號雜訊比(S/N)進行各項控制因子與水準之探討，進而分析得到最適化組合與最佳品質，且能有效減少實驗次數與數據整理所耗費的時間與花費，更可利用回歸預測獲得全因子品質輸出。

貳、基礎理論

震盪式熱管（pulsating heat pipe）簡稱PHP，為近幾年來才被注意的新散熱概念，具有構造簡單、成本便宜且性能優異等特性，將是未來所被看好的一種散熱方式。

2.1 震盪式熱管構造

PHP的構造是由一根細長銅管用彎管機做數次的轉折彎曲而形成，而銅管的內部是無毛細結構。管內有充填部分的工作流體，因整個實驗裝置分為蒸發段、絕熱段、與冷凝段，當發熱元件與蒸發段接觸後，蒸發段的工作流體會因受熱蒸發而形成液塊（Liquid Slugs）和汽泡（Vapor Bubbles）兩相的型態。因二相流在冷凝段與蒸發段之間存在壓力差，而此壓力差會使汽泡形成類似汽泡泵的作用，將液塊一起從蒸發段推動到冷凝段作熱交換，故而達到將熱量帶走的目的。

2.2 管路之設計

震盪式熱管中所用管路之管體材質、管徑為影響PHP運作的關鍵，或者是在製作PHP時該做多少彎道數（輻射數）與流道長度（輻射長度）長短也都是其影響關鍵之一，還有為了觀察出這些影響因素在管內造成怎樣的效應而想辦法做出可視化的模組來觀察其中汽泡和流體的運作情形，因此許多文獻皆在探討這些實驗參數（影響因素）該怎樣的設計才能達到最佳的散熱效能，這亦是目前各國許多學者的研究方向。

2.3 彎道數與流道長度

在Akachi [6] 所發表的多種迴路式熱管中，因型態不同則彎道數與流道長度也隨著變化；M. Groll [7,8] 經過理論模擬與分析後，設計出不同型式的PHP模組其彎道數與流道長度亦無固定；林益邦 [9] 測試單迴路與多迴路PHP散熱效果，並作可視化模組觀察，而游博淮 [10] 以少數迴路與多數迴路PHP做實驗比較；由以上學者實驗經驗結果發現得知彎道數與流道長度有其最佳值存在，所以此參數變化亦是重要的實驗參數。

2.4 工作流體的選用

PHP主要是在蒸發區的外部受熱經由內部流體傳導至冷凝端再由冷凝端外部排除熱源，因此內部流體亦是一大關鍵，由 M.Groll [11] 研究指出用於PHP上之工作流體需有以下條件：(1)低黏滯係數 (2)低潛熱 (3)高比熱

2.5 田口方法

1950年代田口玄一(Taguchi Genichi)博士[12]倡導使用直交表的實驗設計，並領導一群研究人員開發各種直交表、點線圖、應用技巧及解析方法。此方法由於對實驗的結果再現性高，配置實驗的伸縮性大，實驗次數少，實驗配置容易與解析方法簡便等理由與益處，可以改善品質，因此在日本迅速的普及。日本人將田口博士的學問稱為品質工程(Quality Engineering)，歐美各國在1980年代開始接受此方法而稱之為田口方法(Taguchi's Method)。

田口方法是從實驗或理論當中找出影響品質最大的設計參數，透過實際操作或電腦模擬進行實驗，設計參數可為製程參數或是產品設計參數。雖然使用全因子法所找出的最佳組合效果較佳，但田口方法能以少數的實驗就能找出最佳化的趨勢，在工程方面其可行性遠大於全因子法。田口方法有四個要點：(1)基於品質損失函數之品質特性、(2)實驗因子的定義與選擇、(3)S/N比、(4)田口直交表。

2.6 回歸分析

回歸分析是以計量的形式呈現實驗結果，透過回歸模型進行預測、製程最佳化。經過變異數分析後，定義出影響強度顯著的因子，同時，為了瞭解實驗值與回歸模型得到預測值的關係，可依據模型與各實驗數據之總偏差R²檢驗，作為衡量回歸關係強弱的指標，確定回歸模型的可靠程度與確切程度。

參、實驗架設與測試

3.1 實驗測試

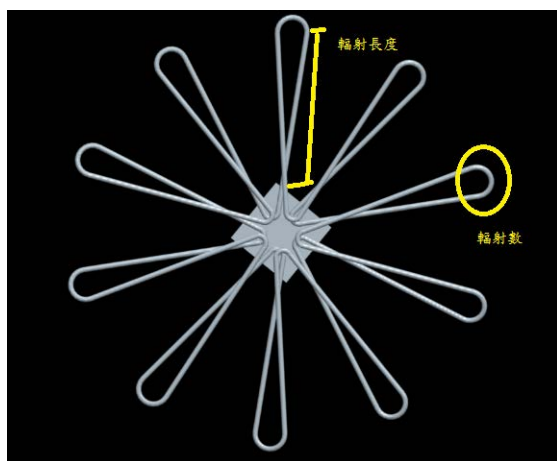
本研究實驗新型之輻射狀型震盪式熱管設計不同的輻射長度、輻射數與各種充填率與加熱功率等多種參數下，測試其震盪效果與散熱性能，並與輻射狀型純銅實心棒比

較，單純以銅傳熱與充填後之RCLPHP比較兩者傳熱與散熱之差距。

3.2 實驗參數

根據文獻提出PHP會因實驗參數的不同而會影響整個PHP所展顯得效能，因此在新型的RCLPHP上，亦設計了以下參數，並觀察這些參數下何種搭配才會顯示出最佳的效能，RCLPHP輻射長度、輻射數說明於圖一，圖二為RCLPHP之實體，另實驗規劃參數如下：

- (1) 管材：紅銅管：外徑3 mm、內徑2.5 mm
- (2) 方形銅板：長、寬 40 mm × 40 mm 厚度2 mm
- (3) 輻射長度 (L)：50 mm、100 mm、150 mm
- (4) 輻射數量 (N)：8、10、12
- (5) 充填比率 (FR)：40%、50%、60%
- (6) 加熱功率 (W)：20、40、60



圖一 RCLPHP輻射長度、輻射數示意圖



圖二 RCLPHP之實體圖

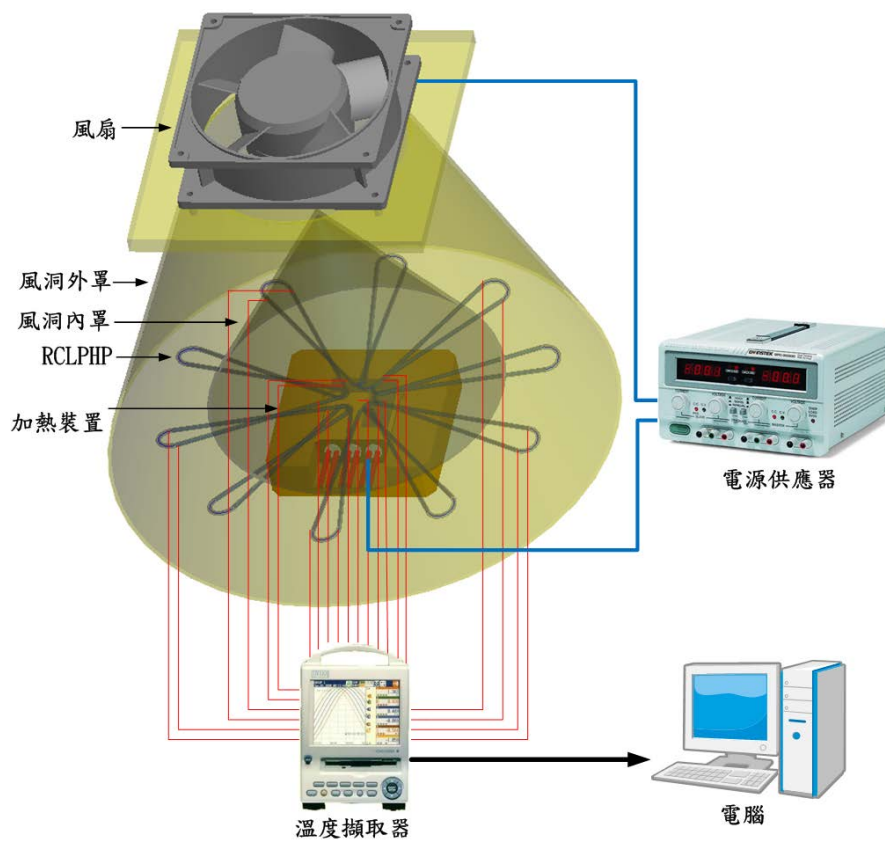
3.3 實驗模組架設

實驗模組測試設備有電源供應器、加熱裝置、熱電偶熔接機、風洞系統、風扇。圖三顯示RCLPHP實驗之整體架設，於RCLPHP之加熱端與冷凝端貼附熱電偶，並由溫度擷取器擷取即時溫度並將數據資料傳輸至電腦；風洞系統則為自行設計，其中包含風扇、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。

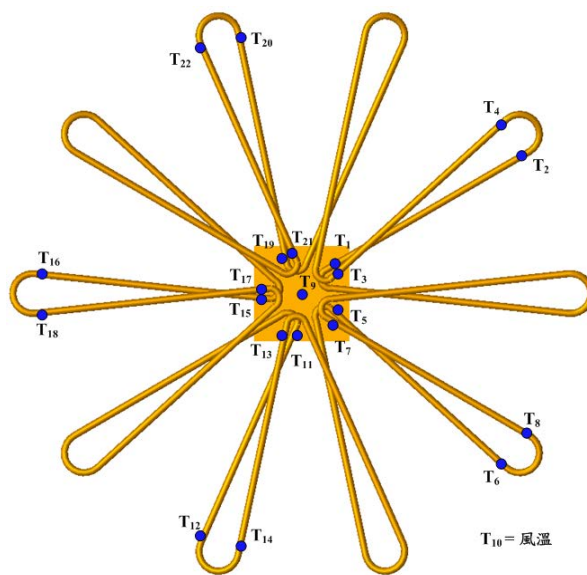
實驗中熱電偶貼附點如圖四所示。蒸發端溫度為 T_1 、 T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_{11} 、 T_{13} 、 T_{15} 、 T_{17} 、 T_{19} 、 T_{21} 點，冷凝端溫度為 T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8 、 T_{12} 、 T_{14} 、 T_{16} 、 T_{18} 、 T_{20} 、 T_{22} 點，中央方形銅片發熱源溫度為 T_9 點，風溫為 T_{10} 點，以利後續熱阻之計算。熱阻之計算採用蒸發端與冷凝端之平均溫差和輸入功率之比值。

3.4 田口方法實驗流程規劃

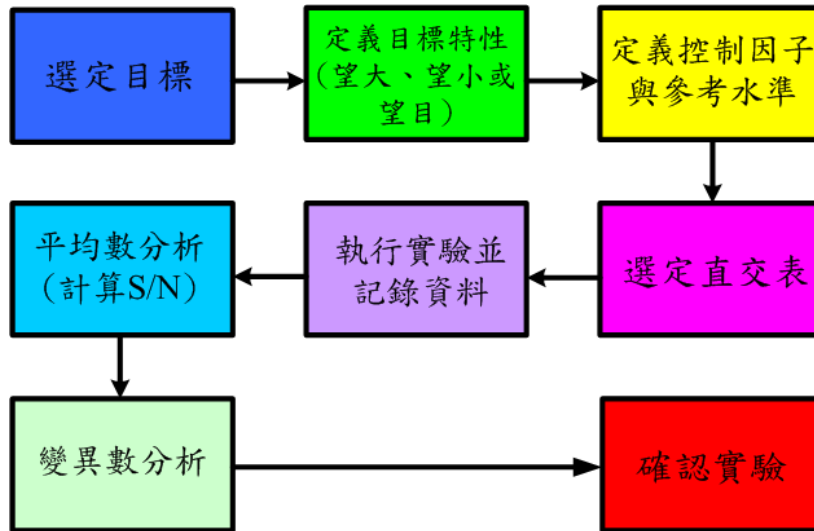
田口方法的實施步驟可分為下列八項，圖五為簡易田口步驟流程。選擇四個因子（RCLPHP輻射長度、RCLPHP輻射數、填充率與加熱功率）及三個水準（表一）之 L_9 直交表（表二）以建立模擬試驗規劃，將所有可能的參數組合採取實驗並記錄相關實驗結果；接著利用MINITAB軟體來對所有數據進行平均數分析、靈敏度分析與變異數分析，藉此求得最佳預測參數。



圖三 RCLPHP實驗架設示意圖



圖四 RPHP熱電偶貼附位置圖



圖五 田口步驟流程

表一 L9 控制因子之水準

	Level 1	Level 2	Level 3
輻射長度	50	100	150
輻射數	8	10	12
填充率	40	50	60
加熱功率	20	40	60

表二 田口方法直交表

	輻射長度	輻射數	填充率	加熱功率
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

肆、結果與討論

實驗主要探討不同實驗參數下對新型震盪式熱管的性能影響，實驗參數有輻射長度 (L) (50 mm、100 mm、150 mm)、輻射數(N) (8個、10個、12個)、填充率(FR) (40%、50%、60%)與加熱功率 (20W、40W、60W)等。觀察其震盪特性與散熱性能。RCLPHP設計中有中央之銅片做模擬熱源處，因此可在各種參數下比較實心銅棒 (solid) 與充填之RCLPHP熱源處溫度與冷凝端溫度，並計算其系統熱阻。

4.1 輻射長度 50mm 下之熱性能

在輻射長度為50 mm下、輻射數為8個、10個、12個與實心銅棒之發熱源溫度皆幾乎成等比例上升；由於有充填之RCLPHP內部有工作流體將蒸發端與冷凝端作熱交換，

而實心銅棒僅靠材料傳熱，傳導速率難以與有充填之RCLPHP比較，因此實心銅棒冷凝端溫度較低，無法做有效的熱交換。實驗結果顯示，當充填率為60%，輻射數為8個的系統熱阻最低，在加熱功率10W未啟動震盪前熱阻值高達0.9 °C/W，加熱功率60W時，震盪循環啟動，系統熱阻值大幅降低至0.21 °C/W。圖六顯示熱管系統熱阻與加熱功率關係圖。

4.2 輻射長度 100mm之熱性能

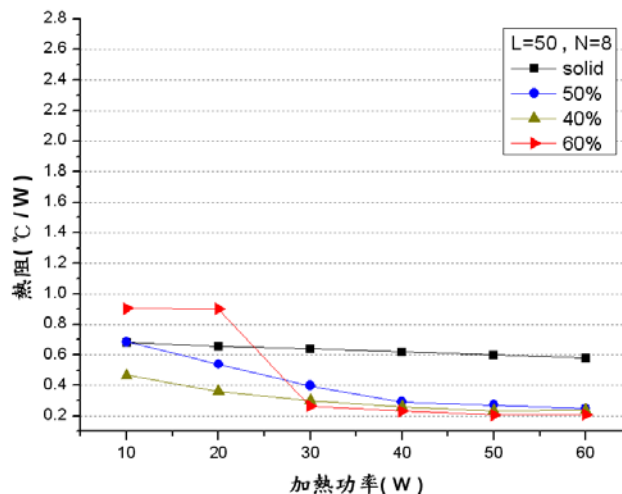
當充填率為 60% 加熱功率10W時，熱管無明顯啟動，震盪幅度不大、震盪頻率少，因此發熱源溫度與系統熱阻皆與實心銅棒差不多。當加熱功率達60W時發熱源溫度80.2 °C與實心銅棒相差35.4 °C，此時系統熱阻下降至0.23 °C/W。圖七、圖八分別為輻射數10與12之系統熱阻與加熱功率關係圖。

4.3 輻射長度 150mm、各種輻射數與填充率比較

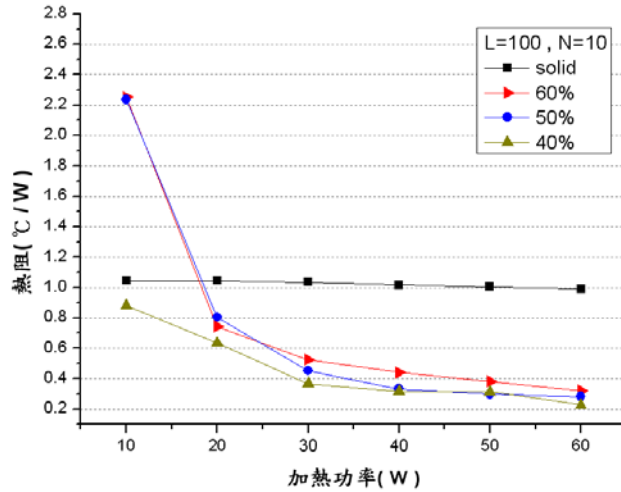
圖九為輻射長度150mm，填充率60%下不同輻射數之溫度與加熱功率關係圖，當加熱功率60W時輻射數12具有最低的發熱源溫度65 °C，此時系統熱阻為0.25 °C/W。

4.4 田口方法實驗結果

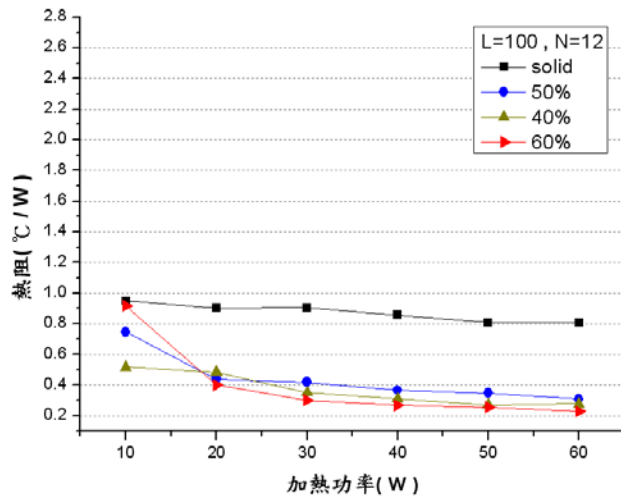
本節將規劃熱管實驗參數，並利用田口方法直交表進行安排實驗規劃組合，由直交表計算四個控制因子各水準的S/N，此值越高則該水準之品質越好並分析最佳控制因子與輸出品質。以L9試驗，四個控制因子水準分別為填充率40%、50%、60%，加熱功率20W、40W、60W，輻射長度50mm、100mm、150mm，輻射數8個、10個、12個。使用L9直交表，實驗結果判斷最適化組合顯示為輻射長度150mm、輻射數12個、填充率60%、加熱功率60W。



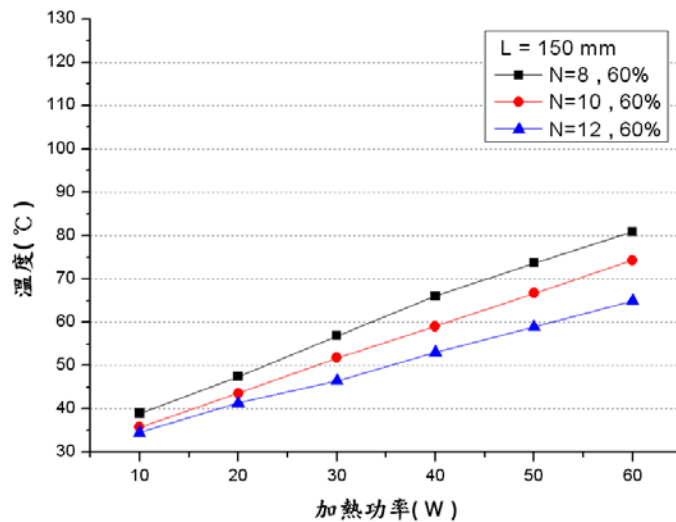
圖六 L=50、N=8 不同填充率之系統熱阻與加熱功率關係圖



圖七 L=100、N=10 不同填充率系統熱阻與加熱功率關係圖



圖八 L=100、N=12 不同填充率系統熱阻與加熱功率關係圖

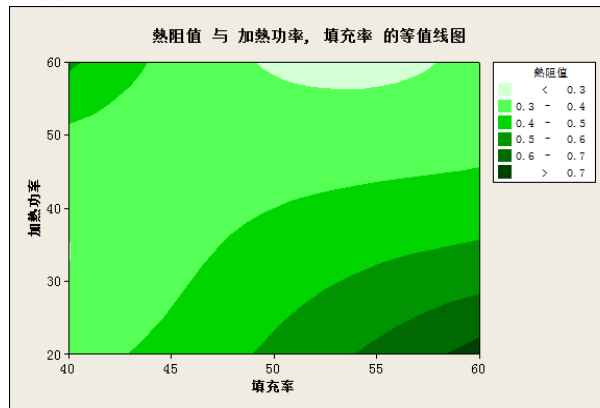


圖九 L=150 填充率60%下不同輻射數之溫度與加熱功率關係圖

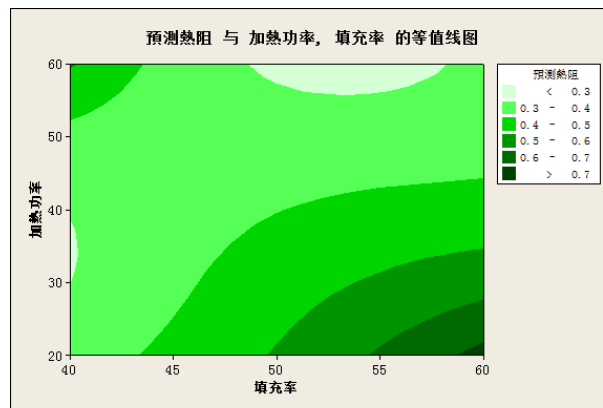
4.5 熱阻值等值線圖分析

使用Mintab對全部控制因子中的其中兩個因子做熱阻值等值線分佈圖；圖十為填充率對加熱功率實際熱阻值，圖十一則為填充率對加熱功率預測熱阻值，其兩者皆顯示較

小的熱阻值出現在加熱功率60 W附近，較大的則出現在20W附近，看得出來加熱功率越高效果越好。另將兩圖進行比對，如圖十二所示，圖中黑色部分為熱阻值實驗與預測 Match 的區域，白色部分為Mismatch的區域，經過Matlab演算結果，Match率達97.26 %，顯示利用Mintab預測結果是可行的。



圖十 填充率對加熱功率實際熱阻值



圖十一 填充率對加熱功率預測熱阻值



圖十二 實驗值與測值熱Match分布

伍、結論

本研究針對新型態輻射狀型震盪式熱管進行分析與其效能探討，輻射狀型震盪式熱管（Radial-type closed loop pulsating heat pipe）簡稱 RCLPHP。管材有銅棒與銅管（管徑 3 mm、內徑 2.5 mm）製作 RCLPHP 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 RCLPHP 比較其散熱效果。在經過實驗後，總結下列幾點：

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。

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。

3. 充填率：(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。

(2) 充填率 60% 雖在最低加熱功率時難以啟動震盪，但對於輻射長度 150 mm 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 150 mm 輻射數 12 加熱功率 60W 時發熱源溫度 65 °C，發熱源溫度具有最低溫度，且系統熱阻亦為相對低點，故可視為最佳之熱性能。

4. 利用田口方法進行實驗規劃和品質分析。已達到減少實驗次數，利用訊號雜訊比 (S/N) 以利各因子與水準之研究，找出最適化品質。根據結果顯示出輻射長度是第三個水準、輻射數是第三個水準、填充率是第三個水準、加熱功率是第三個水準。結果顯示實驗結果判斷最適組合為輻射長度 150mm、輻射數 12 個、填充率 60%、加熱功率 60W 為最適化組合。

陸、參考文獻

1. 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
2. R.S.Gaugler, “Heat transfer device”, U.S. Patent 2,350,348, 1944
3. J. Qu, H. Wu “Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO₂/water and Al₂O₃/water nanofluids” Int. J. Therm. Sci. , pp. 1954–1962, 2011
4. 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, 2005
5. J. Qu, H. Wu, P. Cheng “Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids ”, Int Commun Heat Mass Transfer, 37 , pp. 111–115, 2010
6. Akachi H., US Patent, Patent Number 4921041, 1990
7. M. Groll, P. Charoensawan, S. Khandekar, P. Terdtoon, “Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametric experimental investigations”, Applied Thermal Engineering 23, PERGAMON, pp.2009-2020, 2003
8. M. Groll, P. Charoensawan, S. Khandekar, P. Terdtoon, “Closed loop pulsating heat pipes Part B- visualization and semi-empirical modeling”, Applied Thermal Engineering 23, PERGAMON, pp.2021-2033, 2003
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. 游博淮, “氧化銅奈米流體及水應用於閉迴路型脈動式熱管之研究”, 台北科技大學冷凍空調工程系碩士論文, 2006
11. M. Groll, S. Khandekar, “On the definition of pulsating heat pipes :An overview”, Proc. 5th Minsk Int. Seminar (Heat pipes, Heat Pumps and Refrigerators), Minsk, Belarus, 2003
12. 李輝煌, “田口方法：品質設計的原理與實務第四版”, 高立圖書出版社, 2013。

