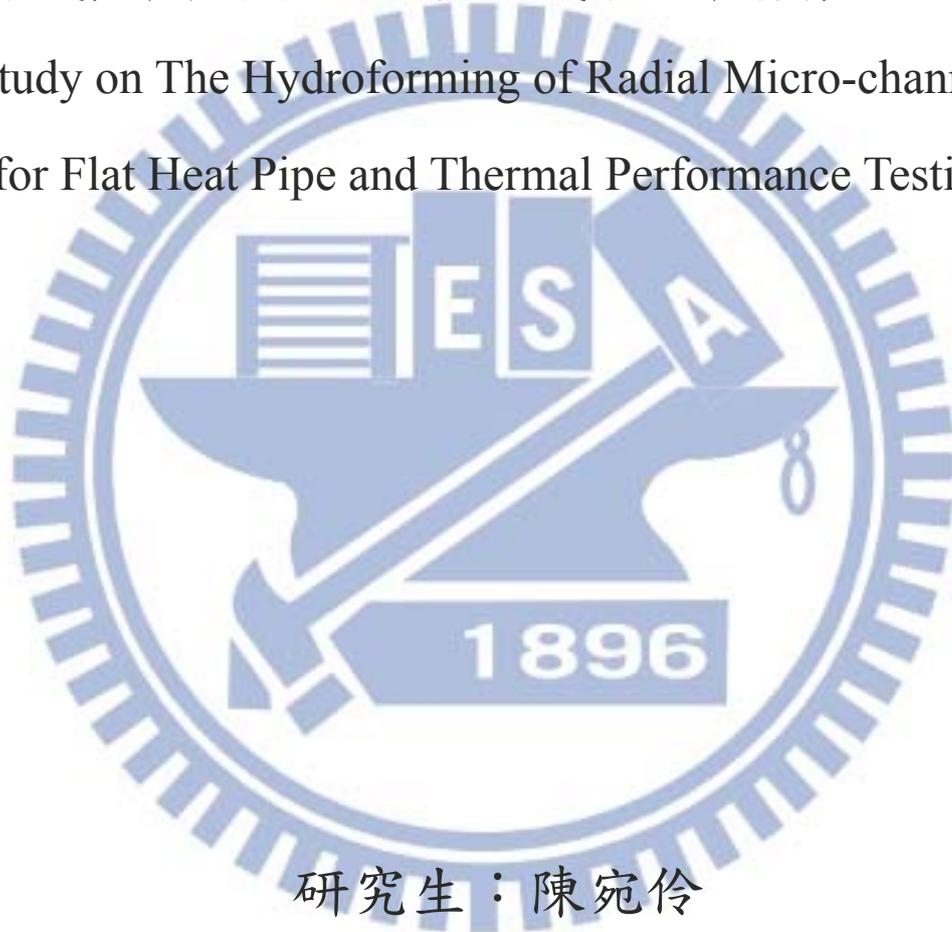


國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

平板式熱管輻射狀微流道液壓成形之研究與熱性能測試

Study on The Hydroforming of Radial Micro-channels
for Flat Heat Pipe and Thermal Performance Testing



研究生：陳宛伶

指導教授：洪景華教授

中華民國一百零三年八月

平板式熱管輻射狀微流道液壓成形之研究與
熱性能測試

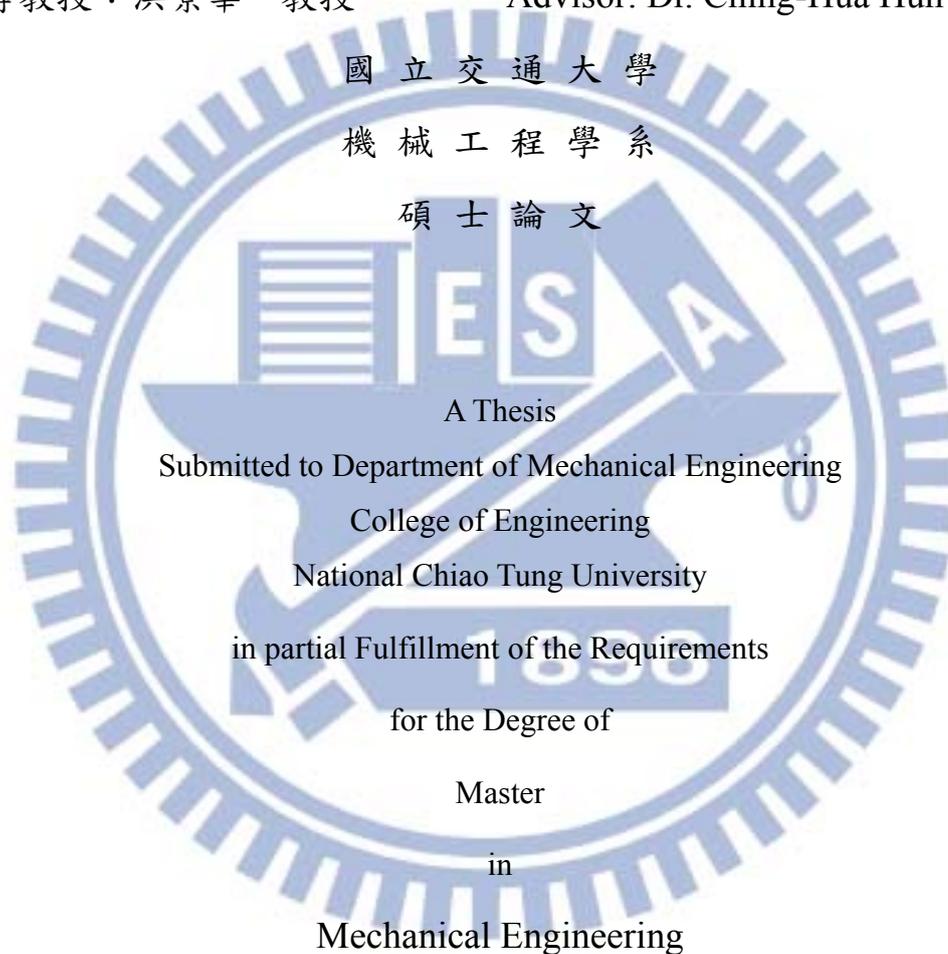
Study on The Hydroforming of Radial Micro-channels
for Flat Heat Pipe and Thermal Performance Testing

研究生：陳宛伶

Student: Wan-Ling Chen

指導教授：洪景華 教授

Advisor: Dr. Ching-Hua Hun



August 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零三年八月

平板式熱管輻射狀微流道液壓成形之研究 與熱性能測試

研究生：陳宛伶

指導教授：洪景華

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究利用實驗室所研發之高液壓成形機台，針對厚度為 0.15mm 的商用純銅(C1100)板材，進行平板式熱管輻射狀微流道之液壓成形實驗。同時使用 Abaqus/Explicit 針對熱管微流道之液壓成形進行數值模擬分析，首先由材料試驗取得板材之材料性質，接著以實測得到之材料性質及模具幾何與液壓實驗之條件為基礎，建立一板液壓成形之有限元素模型，並透過實驗與模擬結果之對照驗證此模型之準確度。

接下來依實際研究過程及結果之有限元素模型預測微流道之成形，決定液壓實驗之實驗參數，最後實際成形所需之輻射狀微流道並製作出微型平板式熱管輻射狀微流道。再以純水為工作流體，探討在不同充填量改變下，平板式輻射狀熱管的熱傳性能之差異性，並實際應用在 LED 燈之散熱，探討其實用性。

關鍵字：液壓成形，平板式熱管，輻射狀微流道，有限元素

Study on The Hydroforming of Radial Micro-channels for Flat Heat Pipe and Thermal Performance Testing

Student: Yu-Wen Wang

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

In this study, a high-pressure hydroforming apparatus with a maximum working pressure of 250MPa was used to fabricate the wick structures for the flat heat pipe. Copper sheets (C1100) with a thickness of 0.15 mm were tested in the hydroforming experiment. At the same time, finite element analysis (Abaqus/Explicit) was used to analyze the hydroforming process numerically. A finite element model of sheet metal hydroforming was based on material properties gotten from material testing, and conditions of hydroforming. And this research compared the results of simulation and hydroforming experiment to verify the accuracy of the finite element model. After that, this finite element model was used to predict the formability of radial micro-channels to decide experiment parameters of hydroforming. A radial flat heat pipe was assembled with hydroformed radial micro-channels and filled with water as working fluid in vacuum environment. Then, thermal performance experiments were conducted by using different amount of working fluid, and subsequently this radial flat heat pipe was also used on cooling LED practically.

Keywords: Hydroforming, Radial Flat Heat Pipe, Radial micro-channels, Finite Element Analysis

致謝

兩年的碩士生涯時光匆匆的就過去了，這兩年的時光過得十分充實也成長了許多。首先，我要感謝我的指導教授洪景華老師，在學業及研究上不時地給予我許多寶貴的意見，指點我正確的方向，使我獲益良多，謝謝老師這兩年來不辭辛勞的指導。

同時，本論文的完成也特別感謝口試委員徐瑞坤老師、洪榮崇老師以及陳申岳老師在口試時對於論文所給予的指教並提供寶貴的建議，使得論文更加完善。

感謝實驗室的夥伴在這兩年間的陪伴，使我的研究生活多采多姿。首先感謝洪榮崇學長，在我的研究上給予許多協助與建議，使得我的實驗能夠順利的完成。感謝志嘉學長和渝文學長，雖然已經在工作了但仍然給了我許多的幫助，也提供了許多建議解除我所遇到的困難以及疑惑。也感謝博班的學長姐們在研究中所給予的協助以及寶貴的建議，同時也感謝可愛又有趣的學弟妹們給予很多幫助，幽默風趣的佑傑和可愛的岳洲常常帶給實驗室歡樂；文青哲維在我做實驗的時候幫忙了我許多，提供了做實驗的歡樂時光；可愛又細心的紅豆在生活中給了我許多的幫忙，還有常常跟我聊天；精通電腦的緯綸常常幫忙修電腦，也感謝一起奮鬥的好夥伴，毛髮很多長的很像小彬彬的笛蘇是緩解苦悶生活的好夥伴；打 LOL 後會轉性的祺津是喝牛肉湯的好朋友不時地也會給我一些非常有用的建議；稀疏但不減帥氣的東祐是聊天的好夥伴希望你趕快擺脫單身。還有我的摯友柯姿瑜，陳柏廷以及邱于恆，因為有你們精神上的支持，我才能度過一次又一次的難關。

感謝我的家人對我無怨無悔的付出，也給了我許多鼓勵，讓我無憂無慮地完成研究所學業。最後，要感謝交大土地公幫助我的實驗順利，仙草蜜萬歲!真的非常謝謝所有幫助過我的人們!因為有你們才有這本論文的誕生。

陳宛伶 謹誌

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 簡介.....	1
1.1.1 平板式熱管介紹.....	3
1.1.2 高液壓微成形技術.....	6
1.2 文獻回顧.....	7
1.2.1 平行狀流道熱板.....	7
1.2.2 輻射狀流道熱板.....	8
1.3 研究動機與目的.....	9
1.4 研究方法.....	10
1.5 論文計畫書架構.....	11

第二章 熱管相關簡介與基本理論	13
2.1 熱管作動原理	13
2.2 熱管作動範圍與熱傳極限	16
2.2.1 熱管作動範圍	16
2.2.2 毛細極限(Capillary Limitation).....	17
2.2.3 沸騰極限(Boiling Limitation)	17
2.2.4 飛濺極限(Entrainment Limitation).....	18
2.2.5 黏滯極限(Viscous Limitation).....	18
2.2.6 冷凝極限(Condenser Limitation)	18
2.2.7 連續流極限(Continuum Flow Limitation).....	19
2.3 熱管性能評估	19
第三章 材料性質與實驗	21
3.1 材料實驗目的	21
3.2 實驗理論	21
3.3 實驗方法	22
3.4 實驗結果	24
第四章 液壓成型模擬與實驗	25

4.1 實驗機台與模具介紹	25
4.1.1 高液壓成形機台	25
4.1.2 模具設計	27
4.1.3 量測儀器	28
4.2 有限元素模型	29
4.2.1 有限元素模型之基本假設	30
4.2.2 建立模型	30
4.2.3 建立模型分析及邊界條件設定	31
4.2.4 網格收斂性測試	32
4.2.5 接觸設定	36
4.4 小結	50
第五章 熱管之熱性能實驗與 LED 燈實測	51
5.1 熱管設計與製作	51
5.1.1 密閉容器	51
5.1.2 容器組裝與氣密性	53
5.1.3 工作流體選用與填充	55
5.2 熱性能實驗	56

5.2.1	實驗設備	56
5.2.2	熱管性能測試步驟	59
5.3	熱性能實驗結果	60
5.4	LED 燈散熱實驗	62
5.4.1	實驗設備	63
5.4.2	實驗結果	65
第六章	結論與未來工作	67
6.1	結論	67
6.2	未來工作	68
參考文獻	70
附錄 A	平板式熱管輻射狀微流道之設計規格	72
附錄 B	矽膠電熱片詳細設計規格	75

圖目錄

圖 1.1	LED 發光效率與溫度的關係圖[1].....	2
圖 1.2	LED 壽命與溫度關係圖[2].....	2
圖 1.3	LED 發射波長與溫度關係圖[3].....	2
圖 1.4	傳統一維熱管[5].....	4
圖 1.5	平板式熱管[6].....	4
圖 1.7	毛細結構示意圖(一維熱管)[7].....	6
圖 1.8	氣體流道(左)、中層隔板(中)、液體流道(右) [7]	8
圖 1.9	接合完成的流道剖面圖[7].....	9
圖 1.10	輻射狀熱管之實體圖.....	9
圖 1.11	輻射狀熱管之 3D 圖	9
圖 2.1	傳統一維熱管示意圖[10].....	15
圖 2.2	平板式熱管示意圖[11].....	15
圖 2.3	平板式輻射狀熱管示意圖[12].....	15
圖 2.4	熱管作動範圍之三相圖[13].....	16
圖 3.1	MTS-810 拉伸試驗機.....	16
圖 3.2	應變規.....	22

圖 3.3 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)	23
圖 3.4 紅銅拉伸試驗試片配置圖	23
圖 3.5 單軸拉伸實驗之結果	24
圖 4.1 高液壓成形機台	26
圖 4.2 高液壓成形機台工作原理圖	26
圖 4.3 高液壓成形機台工作區	27
圖 4.4 輻射狀流道模具實體圖	28
圖 4.5 模具示意圖	28
圖 4.6 詳細模具之流道尺寸(mm)	28
圖 4.7 雷射位移感測實體圖	29
圖 4.8 有限元素模型	31
圖 4.9 邊界條件施加示意圖	32
圖 4.10 流道編號及位置示意圖	34
圖 4.11 網格邊長 0.1mm 之流道深度分布模擬結果	34
圖 4.12 網格邊長 0.07mm 之流道深度分布模擬結果	35
圖 4.13 網格邊長 0.05mm 之流道深度分布模擬結果	35
圖 4.14 網格邊長 0.03mm 之流道深度分布模擬結果	35

圖 4.15	有限元素模型摩擦係數之接觸對示意圖	36
圖 4.16	模具與板件間摩擦係數 0.2 之流道深度分布模擬結果	37
圖 4.17	模具與板件間摩擦係數 0.15 之流道深度分布模擬結果	38
圖 4.18	模具與板件間摩擦係數 0.1 之流道深度分布模擬結果	38
圖 4.19	模具與板件間摩擦係數 0.05 之流道深度分布模擬結果	38
圖 4.20	壓料板與板件間摩擦係數 0.1 之流道深度分布模擬結果	40
圖 4.21	壓料板與板件間無摩擦係數之流道深度分布模擬結果	40
圖 4.22	不同液壓力成形出之輻射狀微流道	42
圖 4.23	液壓力 100MPa 成形實驗之流道深度分布結果	42
圖 4.24	液壓力 130MPa 成形實驗之流道深度分布結果	43
圖 4.25	液壓力 150MPa 成形實驗之流道深度分布結果	43
圖 4.26	液壓力 100MPa 模擬之流道深度分布結果	44
圖 4.27	液壓力 130MPa 模擬之流道深度分布結果	44
圖 4.28	液壓力 150MPa 模擬之流道深度分布結果	44
圖 4.30	液壓力 100MPa 之新模具流道深度分布模擬結果	47
圖 4.31	液壓力 170MPa 流道深度分布模擬結果比較(新模具)	47
圖 4.32	不同液壓力成形出之輻射狀微流道(新模具)	48

圖 4.33 液壓力 100MPa 流道深度分布實驗結果比較(新模具).....	48
圖 4.34 液壓力 170MPa 流道深度分布實驗結果(新模具).....	49
圖 4.35 液壓力 100MPa 流道深度實驗結果與模擬結果比較(新模具)	49
圖 4.36 液壓力 170MPa 流道深度實驗結果與模擬結果比較(新模具)	49
圖 5.1 平板式熱管組成圖	52
圖 5.2 組裝完成之平板式熱管	53
圖 5.3 真空幫浦與真空度計	54
圖 5.4 熱管真空度	55
圖 5.5 熱管量測架設示意圖	56
圖 5.6 實際裝置照片	57
圖 5.7 電源供應器	57
圖 5.8 恆溫冰水機	58
圖 5.9 冷卻銅塊	58
圖 5.10 絕熱棉包覆圖	59
圖 5.11 不同填充率熱管蒸發段與冷凝段之溫度差對輸入功率關係圖	61

圖 5.12 不同填充率熱管蒸發段溫度對輸入功率關係圖	62
圖 5.13 LED 壽命與溫度關係圖[2].....	63
圖 5.14 LED 燈泡中各項參數示意圖[19].....	63
圖 5.15 實驗量測架設示意圖	64
圖 5.16 實際裝置照片	64
圖 5.17 LED 燈實際照片	65
圖 5.18 LED 燈泡與 LED 燈貼附於平板式熱管之燈板(Ts)溫度比較	66
圖 A.1 上蓋版.....	72
圖 A.2 中間框及中間墊片.....	73
圖 A.3 下底座.....	74

表目錄

表 4.1 液壓力與夾持壓力對照表.....	32
表 4.2 板件與模具間摩擦係數設定之模擬結果比較	37
表 4.3 壓料板與板件間摩擦係數設定之模擬結果比較	40
表 4.4 模具前 11 條流道寬度量測結果.....	45



第一章 緒論

1.1 簡介

LED 產業是近年來被認為最有潛力的產業之一，而隨著相關周邊積體電路控制元件的日漸成熟，LED 的應用日漸多元化，從早期低功率地電源指示燈及手機按鍵光源，進而發展至一般照明產品，因此消費者期待 LED 進入照明市場後能夠成為新的照明光源之背景下而成為極有前景的潛在市場。

LED 具有體積小、耗電低、反應時間快，產品壽命較其他光源長及不含對環境有害的汞等優點，但在散熱的部分卻是 LED 的一大問題。目前 LED 的輸入功率並沒有辦法完全轉換成熱能，剩下的能量便會在 LED 內部產生熱，如此一來不僅會影響 LED 的發光效率(如圖 1.1)及使用壽命(如圖 1.2)，還會改變它的發射波長(如圖 1.3)，因此將熱管散熱的技術應用在 LED 上成為一項重要的研究。

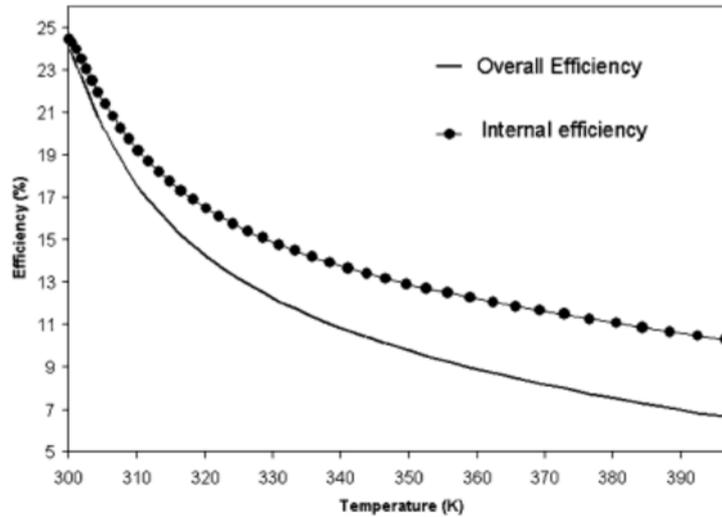


圖 1.1 LED 發光效率與溫度的關係圖[1]

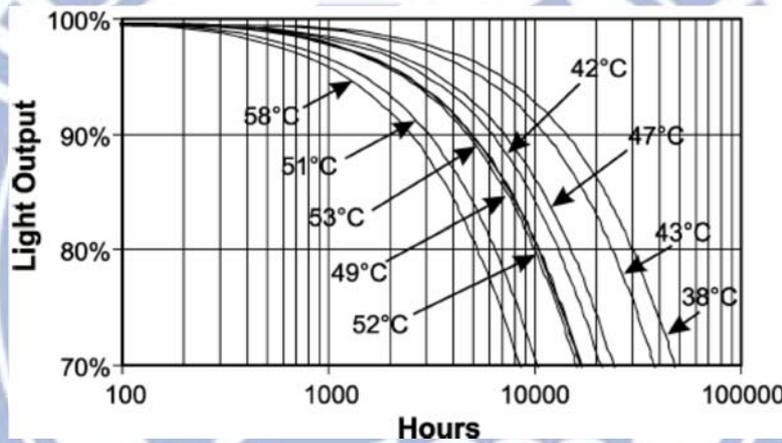


圖 1.2 LED 壽命與溫度關係圖[2]

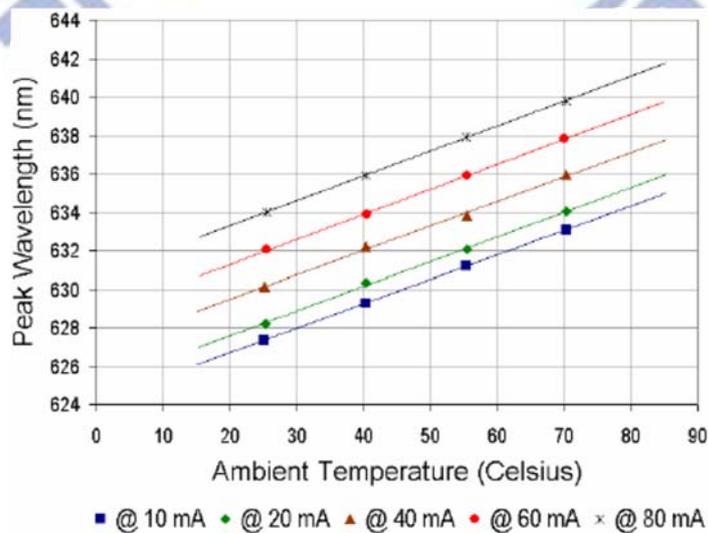


圖 1.3 LED 發射波長與溫度關係圖[3]

1.1.1 平板式熱管介紹

熱管(Heat Pipe)又稱為熱的超導體(Super Conductor)，其特點為藉由工作流體相變化所吸收或釋放之潛熱，而能在小溫差下快速地傳遞熱量，其在電子電機、機械和自然能源等方面皆有應用。

傳統散熱元件常用之材料為鋁，其熱傳導率為 237 W mK^{-1} ，質量輕並具有高延展性，但隨著散熱需求之大幅提高，銅已逐漸取代鋁成為散熱元件之主流材料，銅具有絕佳之熱傳導特性，其熱傳導率為 398 W mK^{-1} ，僅次於銀，亦具有高延展性。而熱管具有良好的散熱性能，可以有效解決散熱問題，其分為傳統一維管狀熱管及平板式熱管。其中傳統管狀熱管(圖 1.4)在熱端與冷端的熱傳遞路徑是將熱管以黏貼方式黏貼，在微觀下仍殘留細微空間因而阻礙熱傳遞，進而導致其接觸部分產生熱阻抗過高的情況，而平板式熱管沒有上述之缺點因此能提供更佳的散熱需求。



圖 1.4 傳統一維熱管[5]

平板式熱管(Flat Heat Pipe)底部有較大面積可以完全貼附在熱源上(圖 1.5)，因此在熱傳過程中有助於保有散熱元件的均溫性和降低散熱元件底部的熱阻，進而提高散熱性能。而輻射狀之平板式熱管(圖 1.6)的設計，將熱源置中，不但提升了散熱面積和熱傳量及有效降低熱管之熱阻，也利於加快工作液體的回流速度。



圖 1.5 平板式熱管[6]



圖 1.6 輻射狀之平板式熱管[6]

毛細結構(Wick)在熱管傳遞熱熱量的過程中占有重要的地位，因為熱管內部汽化凝結後的工作液體，需藉由毛細組織的毛細力來驅動液體流回到熱端，帶走熱量降低熱端溫度。而熱管的毛細結構大概可分為溝槽式 (Groove)、網格式 (Mesh) 以及粉末燒結式 (Sintered Porous) (圖 1.7)。溝槽式目前受限於加工條件的因素與高成本，量產難度高；網格式雖然不受限於熱管幾何尺寸，可彈性的裁剪應用，但是由於其毛細力中最差的以致在高熱量的情況下未能有效利用；燒結式由於抵抗重力效果好、本身材料穩定性佳，但也因為大都是金屬粉末燒結，反覆使用會有氧化問題的存在，且孔徑大致在數百微米間，毛細力有限。溝槽式毛細結構製程為金屬滾壓成形或是金屬切削成形，成形之溝槽寬度(大於 0.2mm)均遠大於網格式或粉末燒結式(寬度約 0.04-0.15mm)，很難成形出寬度微小之溝槽，導致其熱傳效果較低，且有加工成本偏高和量產難度高等缺點。因此本研究欲利用高液壓成形，來解決目前傳統溝槽式毛細結構成形製程的一些限制及缺點。

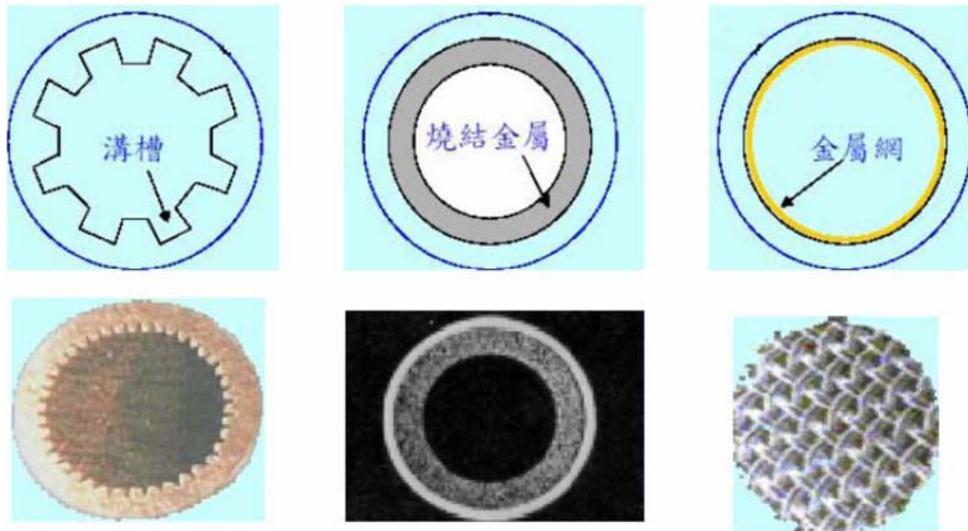


圖 1.7 毛細結構示意圖(一維熱管)[7]

1.1.2 高液壓微成形技術

高液壓成形技術是利用高壓油作為工作介質，利用壓縮流體特有的等方向性(isotropic)，對板件進行加壓成形；相比之下，傳統壓印成形所施加的加工力並非均勻，且會因模具位置不同而有成形性效果的差異。另外，於液壓成形過程中，由於只有板件和模具間具摩擦力影響，因此減少了摩擦力對製程的影響，壓縮流體與胚料間並不存在摩擦力；而傳統壓印製程其上下模具和板件間會產生大量摩擦力，導致所需的製程力遠大於高液壓成形，因此高液壓成形的結果在於均勻性及成形深度皆較佳。本實驗室已建立一高液壓成形機台，能夠產生高達 250Mpa 之液壓，已可用於微流道成形之用。

1.2 文獻回顧

熱管能有效解決元件的散熱問題，因此針對熱管的相關研究不曾間斷，並且蓬勃發展且屢屢創新。由於本研究主要將重點放在平板式微尺寸之熱管及輻射狀流道設計的平板式熱管，因此以下將對此類型熱管的研究做一整理，並以文獻回顧為研究的參考依據，做更進一步的研究及分析。

1.2.1 平行狀流道熱板

Lips 等人[8]在銅板上加工出深度為 $400\ \mu\text{m}$ 與寬度為 $400\ \mu\text{m}$ 之毛細微流道，並留有高度 2mm 給蒸汽流動的空間，使用之工作流體為甲醇，討論在不同的熱傳量及不同的填充率下，因流體沸騰造成熱管效率的影響情形，其結果顯示在高的填充率下，熱傳量高使流體沸騰的現象並不影響熱管之效率，但在低的填充率下流體沸騰的現象會使得蒸發段工作流體供應不足，而造成乾燒影響熱管效能。

王[9]利用高液壓成形技術，在銅板上成形出寬度為 0.2mm 的毛細微流道，並留有高度 0.5mm 給蒸汽流動的空間，選用純水(RO 逆滲透純水機取得)作為工作流體，並討論不同深度(0.074mm 、 0.131mm 、 0.148mm)及不同充填量(30% 、 50% 、 70%)下的熱管性能。結果顯示當成形出的流道深度越深，均熱能力越好，有效的提

升熱管性能；在填充率的方面，當填充量為 70%較其他填充量有較好的均熱能力。而研究中性能最佳之平板式熱管，為流道深度 0.148mm 填充工作流體 70%之熱管，熱阻抗為 0.34 KW^{-1} ，換算熱傳導率為 891 WmK^{-1} 。

1.2.2 輻射狀流道熱板

Kang[7]等人利用半導體濕蝕刻技術在矽晶片上成形出輻射狀微流道，且利用中層隔板將氣體和液體做分流的結構，如圖 1.8[7]。且氣體和液體之流道皆為梯形狀，其中液體流道形狀在靠近中間的寬度為 $150\mu\text{m}$ ，底寬為 $500\mu\text{m}$ 。以 DI-Water(去離子水)作為工作流體以不同的填充量(30%、53%、70%)下熱管之效能，其結果為在填充率為 70%時，蒸發段與冷凝段之溫度差為 47°C 時，熱管有較好之均熱能力。



圖 1.8 氣體流道(左)、中層隔板(中)、液體流道(右) [7]

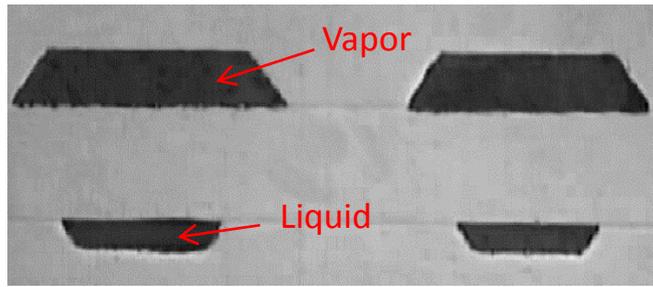


圖 1.9 接合完成的流道剖面圖[7]

Chen[10]等人在鋁基底上加工出寬度 0.4mm，深度 0.35mm 之輻射狀微流道，如圖 1.10、1.11 所示。同樣使用去離子水作為工作流體，討論在不同填充率(18%，37%，55%，74%及 92%)下熱管之效能，其結果顯示在填充率為 55%時之有效熱阻為 $1.81^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 為最佳，並且與沒有做結構之銅片熱阻 $2.97^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 相比有較好之熱性能。

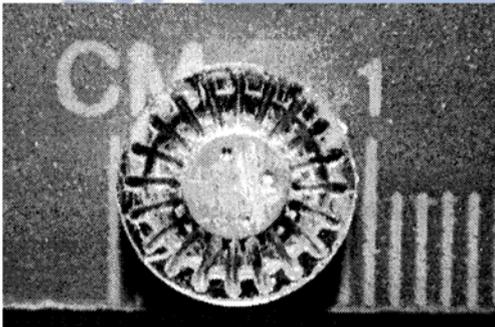


圖 1.10 輻射狀熱管之實體圖

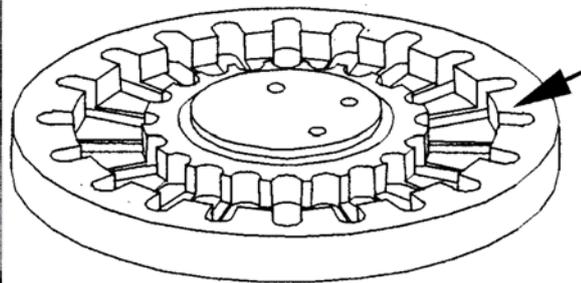


圖 1.11 輻射狀熱管之 3D 圖

1.3 研究動機與目的

本研究室王[9]已以液壓成形成出平板式熱管，並已對其做熱性能測試。但平板式熱管輻射狀微流道之設計能將熱源置中，因此比起平板式熱管更適合用於 LED 燈之散熱上。且輻射狀微流道不但可以提升熱管之熱傳量與散熱面積，也利於具毛細力之毛細結構加

快工作液體回流的速度。而由文獻所整理之結果，發現平板式熱管輻射狀微流道在實務層面的應用，是比較少討論到的。

而由於高液壓成形技術具有以下優點：(1) 高深寬比：利用高靜水壓成形所得之深寬比高於傳統沖壓成形之結果。(2) 均勻之工作壓力：液壓具有等向性，因此各方向所受到的壓力是一致的。

(3) 單一模仁：與傳統沖壓成形相比，由於只需一個模仁減小了摩擦所造成之影響，因而降低了對材料流動的影響。若能將此成形技術應用於熱管毛細結構中，可藉此成形出比傳統製程更細小之微流道；且與半導體製程技術、放電加工等精密加工技術相比，液壓成形之生產成本較低，生產效率及成品精度能提高等優勢。

因此本研究將使用高液壓機台成形出平板式輻射狀熱管所需之輻射狀微流道，除了討論填充率對熱管效能之影響外，亦將此平板式熱管輻射狀微流道實際應用於 LED 燈之散熱測試。

1.4 研究方法

本研究主要分成兩部分，第一部分為高液壓成形實驗，第二部分則為組裝平板式熱管輻射狀微流道之熱性能測試。

在第一部分的高液壓之成形部分，將使用商用純銅(C1100)作為液壓成形實驗之材料，因為純銅不但具有絕佳之熱傳導性，亦有高延展性。並考慮到熱管內部需真空，板材強度不可太弱因此不能使

用太薄之板材，因此將選擇厚度為 0.15mm 之純銅板材作為成形之板件。首先，利用材料試驗取得紅銅材料性質，參考王[9]的研究之流道尺寸，設計一輻射狀微流道模具(流道尺寸詳見論文第 4 章)，接著根據取得之材料性質及高液壓成形實驗製程建立一套有限元素模型，並配合此模型，接下來將模擬結果與實驗結果數據比較，驗證有限元素模型的合理性。在建立合理之有限元素模型後，便可用於預測在不同液壓參數之模具下板件之成形。

研究之第二部分則是將高液壓成形出之輻射狀微流道，組裝成平板式熱管輻射狀微流道，工作流體的選擇則考慮和純銅的相容性，且針對 LED 燈之散熱，水為符合其作動溫度範圍(30°C~200°C)之工作流體，因而工作流體採用純水(RO 逆滲透純水機取得)。隨後將探討不同填充率之改變下平板式熱管輻射狀微流道的熱傳性能差異性，並實際應用在 LED 燈之散熱上。

1.5 論文計畫書架構

本論文共分為五章，就研究背景進行介紹後，分為：

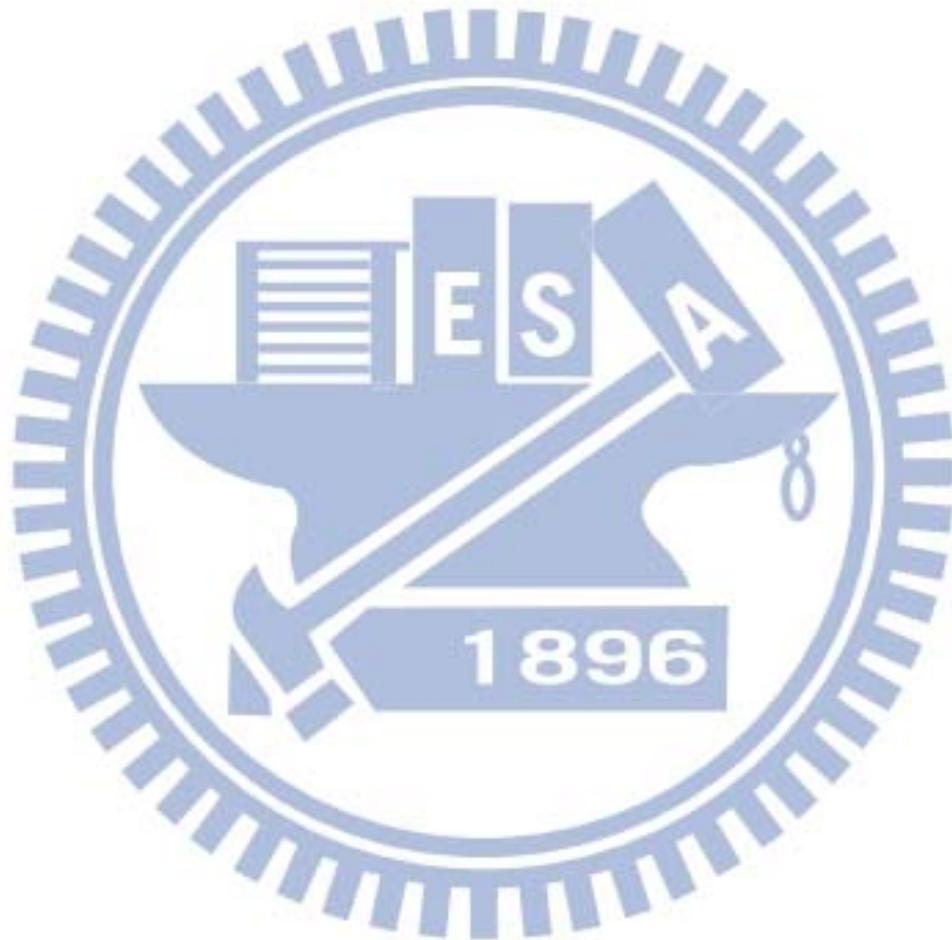
(第二章) 熱管相關簡介與基本理論：介紹熱管作動原理。

(第三章) 材料性質與試驗：取得純銅之材料性質。

(第四章) 液壓成型實驗與模擬：有限元素模型模擬結果與液壓實驗結果驗證，並成形出平板式輻射狀熱管所需之微流道。

(第五章) 熱管之熱性能測試：介紹熱性能實驗設備及熱管的設計組裝，並做不同填充率改變下之實驗性能結果比較及實際應用於LED 燈之散熱上。

(第六章) 結論與未來工作。



第二章 熱管相關簡介與基本理論

本章中將對熱管之主要構造及作動原理，及熱管之特點作介紹，並比較傳統熱管及平板式熱管之差異，探討熱管之作動範圍與熱傳限制，最後說明熱管性能與評價的方法。

2.1 熱管作動原理

熱管是一種具高導熱性能的元件，藉內部工作流體吸收熱能產生的相變化來做為熱的傳遞，由於熱管可以在很小的溫差範圍產生極大之熱量，且不需外部供給動力即可運作，因此熱管又有熱之超導體的別稱。

傳統的熱管內部由密閉系統、毛細結構及工作流體三大部分所組成，而其主要作動條件是在於真空之下，提供工作流體達到兩相變化，促使潛熱運作，因此需要一完整的封閉系統。假使沒有得到良好的封閉系統，將會使熱管本身作動發生停滯，其主要原因為熱管內部漏氣後，將導致內部壓力回升，造成毛細極限(Capillary limitation)現象，使毛細壓降小於整體總和造成毛細力失效，同時也造成工作液體汽化後由空隙外流，導致工作液體無法達到兩相交換之循環效果。毛細結構為提供液體回流之力量，因此應選擇易傳輸工作流體之構造，工作流體則是依照熱管所需使用之溫度範圍且與

熱管本體相容性而作選擇。

就功能而言，熱管則分為蒸發段(Evaporator)、凝結段(Condenser)及絕熱段(Adibatic)三部分，由蒸發段內的工作流體在吸收熱量後汽化所產生的蒸汽壓推動蒸汽由絕熱段流向凝結段，將熱量帶走，而當蒸汽到凝結段的時候會釋放吸收之潛熱並凝結回復成工作流體。藉由毛細構造之毛細力回流至蒸發段，如此不斷的重複熱輸送循環，熱管作動示意如圖 2.1。

平板式熱管的構造與傳統之管型熱管構造相似，而作動原理也與傳統管型熱管相同，最大的不同在於平板式熱管之底部具有較大面積能夠完全貼附於熱源上，因此有助於在熱傳導過程中，保有散熱元件之均溫性以及降低散熱元件底部的熱阻，而提高散熱性，如圖 2.2 所示，而相較之下傳統式管型熱管則因受熱端局限於外型曲面緣故，在熱傳導過程中會有很大之熱阻。

平板式輻射狀熱管在構造上與傳統管式熱管相似，作動原理也相同，最大的差別在於平板式輻射狀熱管為三維流動，也就是輻射狀熱傳輸。因此平板式輻射狀熱管能夠藉此方式將小面積的高熱通量快速的擴散到大面積，以達均熱效果，其構造與工作原理如圖 2.3 所示。

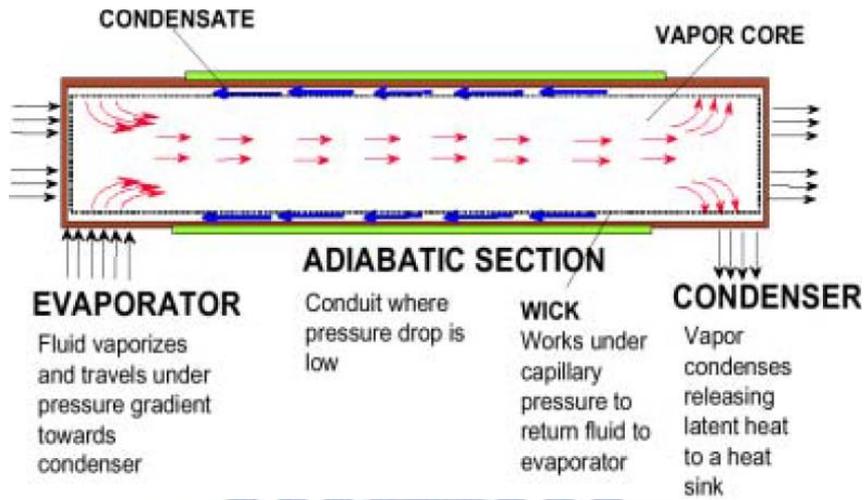


圖 2.1 傳統一維熱管示意圖[10]

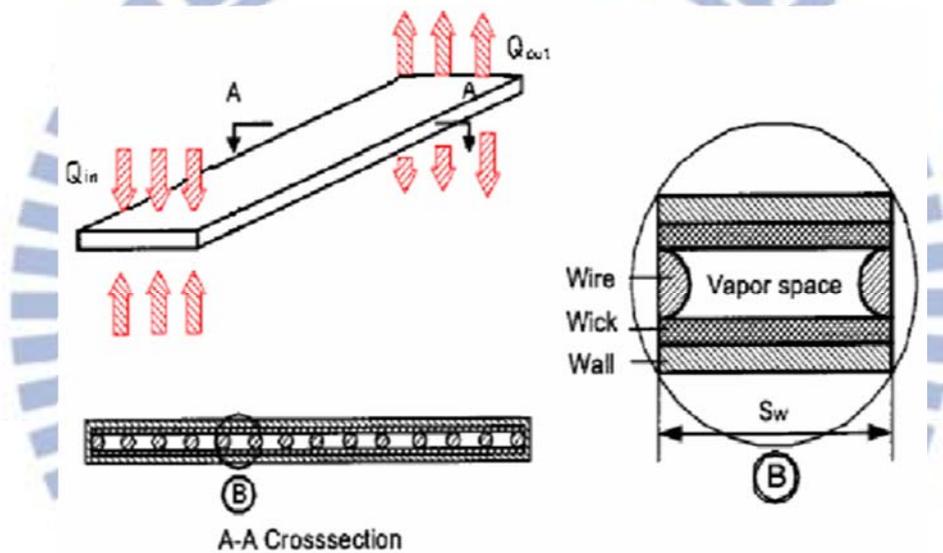


圖 2.2 平板式熱管示意圖[11]

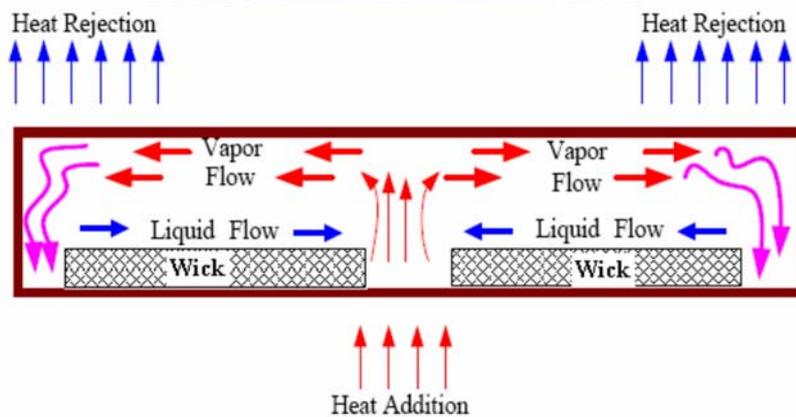


圖 2.3 平板式輻射狀熱管示意圖[12]

2.2 熱管作動範圍與熱傳極限

2.2.1 熱管作動範圍

熱管雖然有熱之超導體的別稱，但也並非能無限制的傳熱，而是要在一定的條件下才能作動。熱管的作動溫度範圍由工作流體種類來決定，亦即必須在工作流體液相和汽相共存的範圍內，也就是介於固體、液體與汽體共存的三相點(Triple Point)到臨界點(Critical Point)間，如圖 2.4。

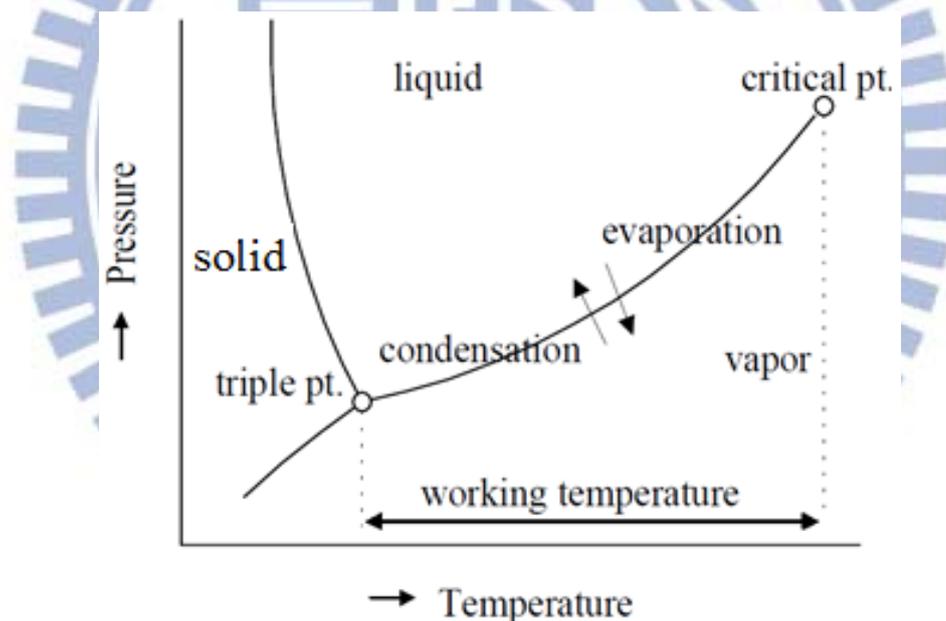


圖 2.4 熱管作動範圍之三相圖[13]

雖然熱管具有優秀的熱傳導效率，但並不可以無限制的輸送熱能，也就是其熱輸效率會有一些操作上的界限，可能限制熱管熱傳輸的物理現象的極限包括毛細極限、沸騰極限、飛濺極限、沸騰極限、冷凝極限與連續流極限等。而隨著熱管形狀與尺寸、工作流

體、毛細結構與操作溫度不同而變化，以下將簡單說明熱管各項操作限制。

2.2.2 毛細極限(Capillary Limitation)

毛細結構主要提供冷凝區的工作流體可以藉由冷熱兩端所產生不同的毛細力差使流體從冷凝區回到蒸發區，因此毛細極限是傳統熱管與微熱管中主要的操作界限。

毛細極限一般於低溫操作之熱管最常見，隨著熱管的熱傳輸量增加，工作流體的質量流率也需隨之增加，但倘若無法超過毛細結構的傳輸能力，在超過此負荷的情況下，工作流體無法及時輸送至蒸發段時，便會在毛細結構內發生燒乾(Dry-out)的現象，甚至造成熱管燒損(Burn-out)，此極限稱為毛細極限。對毛細結構所產生毛細力(ΔP_C)有三種阻力，分別為毛細結構內液體流動的總壓降(ΔP_l)、蒸汽流動的總壓降(ΔP_v)以及重力所導致的位能差造成的壓力(ΔP_g)，而熱管在正常運作下必須滿足式 2.1。

$$\Delta P_C \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (2.1)$$

2.2.3 沸騰極限(Boiling Limitation)

當熱管在高熱通量之情況下時，毛細管內會發生沸騰使得毛細結構與管壁介面處之工作流體達到飽和溫度而產生沸騰汽泡，汽泡

大小達臨界脫離汽泡徑時將離開傳熱並將熱量帶走，但毛細結構會影響汽泡脫離造成汽泡陷於毛細結構內，不但會阻礙工作流體的回流，也會導致傳熱面與毛細結構內產生膜狀(Film)之蒸汽層，因此管壁之溫度會因熱量無法藉汽泡帶離而急遽上升，造成乾燒及熱管燒損，這種現象稱為沸騰極限。

2.2.4 飛濺極限(Entrainment Limitation)

當熱傳輸量增加時，蒸汽流流速會達到一臨界值的狀態，當大過於界限值時，在液-汽介面的蒸汽流所產生的剪應力大於將凝結流體維持在毛細結構中之液體表面張力，致使回流液滴飛散至蒸汽流通道而回流至蒸發段之工作流體不足，降低熱管效率。

2.2.5 黏滯極限(Viscous Limitation)

又稱為蒸汽壓極限，當熱管在低於正常操作溫度下作動時，蒸發區幾乎是不會作動，而蒸汽本身之黏滯力比溫度產生的壓力差還大，此時蒸汽流受到本身黏滯力而停滯，因此限制了熱管的操作性能，這種現象稱為黏滯極限。

2.2.6 冷凝極限(Condenser Limitation)

熱管之最大輸送能力有可能會受限於冷凝段之凝結效率，當氣態之工作流體的凝結效率不好時，將會沒辦法適時提供足夠之工作

流體回到蒸發段，而造成乾燒現象使熱管無法作動。另外，當熱管內初始真空度不好而存在太多一般的空氣時，也會降低熱管之冷凝效果使熱管性能降低。

2.2.7 連續流極限(Continuum Flow Limitation)

對於在極低溫環境操作下的熱管，管內的蒸氣流將失去連續流之特性而可能成為自由分子或是稀薄狀態，使得內部氣體無法到達到連續地流動，熱傳因此受限。連續流的判定可以藉由 Knudsen 數來評估。

$$Kn = \frac{\lambda}{D} = \begin{cases} \leq 0.01 & \text{Viscous Flow} \\ > 0.01 & \text{Rarefied or Free Molecular Flow} \end{cases} \quad (2.2)$$

其中 λ 為蒸氣的平均自由路徑， D 為蒸氣流通路之最小直徑。

2.3 熱管性能評估

熱管主要指標性之性能測試大致可分為熱傳量、熱阻抗與溫度三種。熱傳量是熱管操作中所能輸入熱量的多寡，也就是 Q_{\max} (W, W/cm²)；溫度差則是則是以一定輸入功率時最高溫與最低溫的溫度差；而熱阻抗 R 之定義為溫度差 ΔT 與輸入熱量 Q 之比值，如式

2.3。

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (2.3)$$

以實驗測試來評估熱管的效能時，若使用熱傳量 Q_{\max} 為參考指

標，往往會造成乾燒現象，對熱管造成傷害，因此多以溫度差與熱阻抗為指標。其中又以量測並計算最熱端與最冷端之壁面溫度差 ΔT 和輸入熱量 Q 的比值求得之熱阻值，為熱管性能之主要指標，熱阻抗越小表示熱管性能越好，越能有效傳遞熱量。而有效的熱管能降低蒸發段的溫度，因此當系統操作在穩態下時，蒸發段之溫度高低也是一項重要的參考性質。

藉由了解熱管之主要構造及作動原理，還有熱管的作動範圍與熱傳限制，有助於我們設計熱管。而以 LED 為出發點的熱管設計，主要可能會受限於毛細極限、沸騰極限、冷凝極限及連續流極限，因此設計時須注意工作流體的選用是否適合熱管之作動溫度範圍，盡量避免造成上述之熱傳限制，而流道的尺寸設計也是重要的考量。

第三章 材料性質與實驗

3.1 材料實驗目的

本研究將針對輻射狀微流道液壓成形進行有限元素分析，因此需先透過單軸拉伸試驗求得實驗所使用的厚度 0.15mm 之商用純銅板材彈性係數、真實應力-應變曲線，用以了解此材料之特性，並做為後續有限元素分析材料性質輸入之依據。

3.2 實驗理論

由單軸拉伸試驗可得到材料之工程應變與機台拉伸力，透過換算可以得到材料的工程應力/應變，但在後續在模擬過程中，則是需要真實應力/應變數據，透過 3.1 式換算可以得到所要的數據，但此公式僅適用於材料未發生頸縮前之均勻變形，當頸縮發生之後已不再適用，因此將不考慮頸縮後之數據。

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.2)$$

其中 σ_T ：真實應力 (MPa)、 ε_T ：真實應變、

σ ：工程應力 (MPa)、 ε ：工程應變

將取得的真實應力/應變曲線取其彈性區域進行迴歸分析以取得材料的彈性係數E。求得彈性係數之後，將材料之真實應力/真實應

變曲線利用3.2 式扣除前段彈性部份，進而繪出材料真實應力/塑性應變曲線，再找出一指數定律（Power Law）（式3.3）與其趨近，可利用此指數定律有效表示材料的機械性質[11]。

$$\sigma_T = K(\varepsilon_T^P)^n + \sigma_y \quad (3.3)$$

其中， ε_T^P ：真實塑性應變、 σ_y ：初始降伏應力、 K, n ：常數。

3.3 實驗方法

本研究之拉伸試驗係採用 MTS-810 萬能拉伸試驗機（圖 3.1），並使用應變規貼於均勻變形區域，以量測軸向應變值。實驗所使用之應變規（圖 3.2），為日本共和電業株式會社製造，型號為 KFEM-5-120-C1L1M2R，標距長度(Gage Length)為 5mm。



圖 3.1 MTS-810 拉伸試驗機



圖 3.2 應變規

拉伸試驗試片之尺寸係依照 ASTM-E8M 之規範所決定，然而考慮原始試片取得因素，故將試片大小依原始試片尺寸做等比例縮小，拉伸試片尺寸如圖 3.3 所示。另外，考慮純銅板材之異向性，規劃了三種方向之拉伸試片，其配置如圖 3.4 所示。本實驗在常溫下進行，並設定拉伸速率為 0.02mm/s，將試片拉伸至斷裂，設定擷取器之擷取速率為 50times/s 以紀錄拉伸試驗機上荷重元 (Load Cell) 所量測之荷重值及應變規之應變值，藉此取得材料的機械性質。

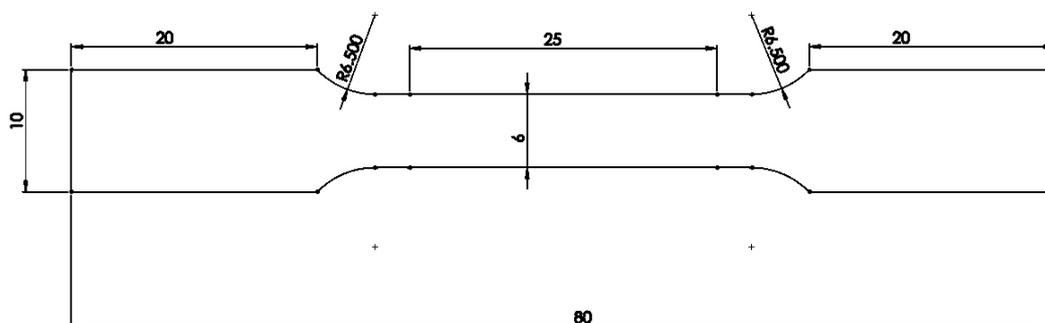


圖 3.3 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)

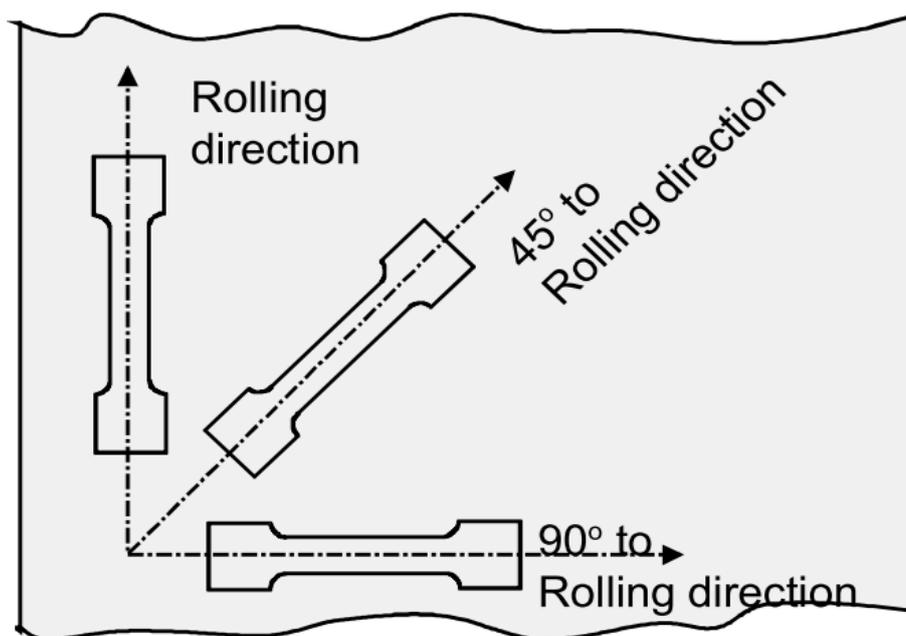


圖 3.4 紅銅拉伸試驗試片配置圖

3.4 實驗結果

為考慮銅板的方向性，單軸拉伸實驗針對同一薄板由滾軋方向為基準，做 0 度、45 度與 90 度三種方向的拉伸試片，單軸拉伸實驗結果如圖 3.5 所示。觀察所得的拉伸曲線只有稍微不同，可視為實驗操作上之誤差。而由結果可知，試片並無明顯的異向性存在，後續將不考慮板材之方向性。

由單軸實驗得知紅銅板之降服強度約為 220MPa，將取得之材料擬和曲線代入有限元素軟體 Abaqus/Explicit 建立合理之有限元素模型，以做後續之分析。

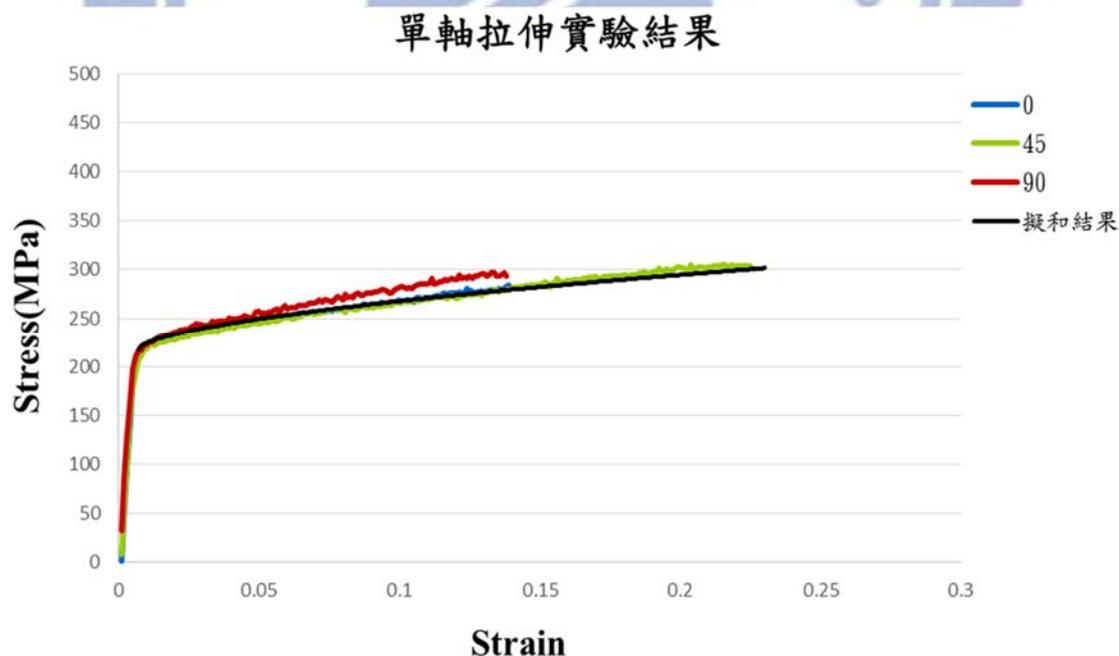


圖 3.5 單軸拉伸實驗之結果

第四章 液壓成型模擬與實驗

由於液壓成型過程中，不同的成形壓力會影響板材的成形性，因此適當的成形壓力能提高其材料成形性，使得成形之平板式熱管有較高的深寬比。因此本章將建立一套有限元素分析模型來預測板材之成形性，並以實際成形出輻射狀微流道確認有限元素模擬結果之準確性，最後依實際研究過程及結果修訂過後之有限元素模型決定液壓實驗參數，以成形出平板式輻射狀管所需之輻射狀微流道供本研究組裝出平板式熱管輻射狀微流道。

4.1 實驗機台與模具介紹

4.1.1 高液壓成形機台

為了成形出輻射狀微流道，本研究利用勤益科技大學精密成形與模擬實驗室之高液壓成形機台進行實驗，機台主要部件如圖 4.1 中所示，藉由下方壓力元件進行增壓並推動擠桿使上方壓力元件內之高壓流體受一高壓並對工件施加一均勻之壓力，如圖 4.2。實驗時將板件放置於工作平台上如圖 4.3 中，藉由下方平台上升，施予負載，使成形區域進行密封，接著推動擠桿，產生高液壓使試片成形，成形完成之後壓力卸除。



圖 4.1 高液壓成形機台

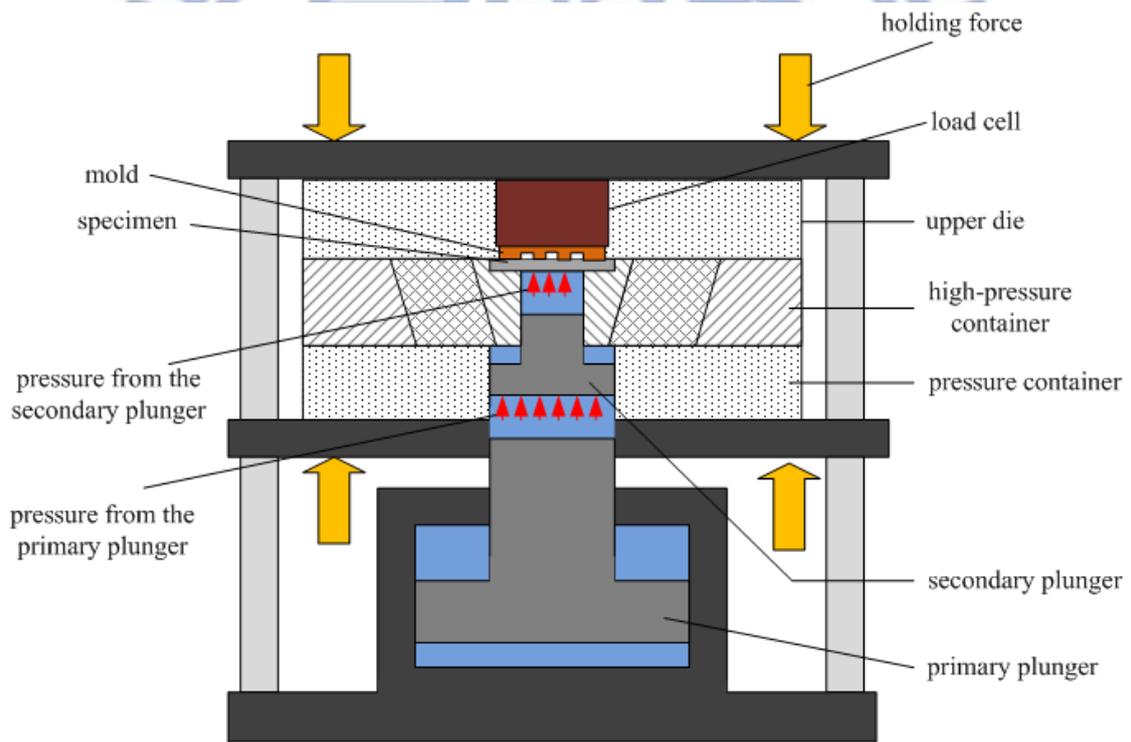


圖 4.2 高液壓成形機台工作原理圖

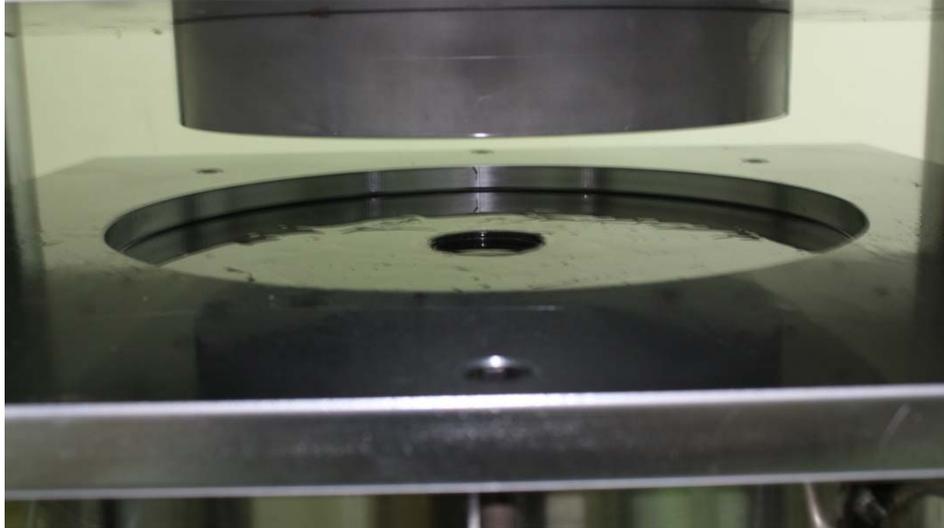


圖 4.3 高液壓成形機台工作區

4.1.2 模具設計

為了能夠透過液壓成形出所需之熱管毛細結構，因此參考王[9]研究之模具尺寸，以及高液壓成形機台可以成形之最大面積作為依據，設計出輻射狀微流道之模具，欲成形出寬度 0.2mm，散熱為直徑 60mm 圓面積。模具材料為工具鋼 SKD61，由於為了成形出 0.2mm 之微流道，因此在考慮板材厚度 0.15mm 後，將模具流道寬度(W)設為 0.5mm，其餘模具尺寸如下：流道間距(S)=0.5mm，導圓角(R)=0.1mm，輻射狀微流道內徑(d)=14mm，外徑(D)=60mm，而為了探討流道最深之深度，將流道深度(H)設為 0.5mm，模具尺寸如圖 4.4、圖 4.5 及圖 4.6 所示。



圖 4.4 輻射狀流道模具實體圖

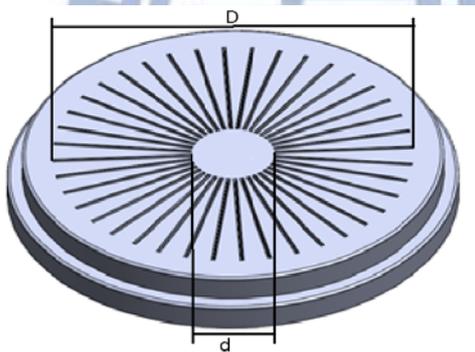


圖 4.5 模具示意圖

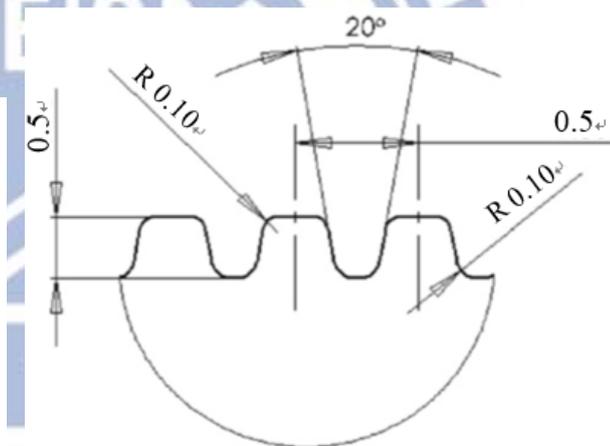


圖 4.6 詳細模具之流道尺寸(mm)

4.1.3 量測儀器

為了量測液壓實驗後之板件流道深度，本研究以 KEYENCE 公司的 CMOS 雷射位移感測器(型號 LK-H020)，搭配電動旋轉平台，每次掃過板件上的 10 個流道，以量測其表面輪廓，如此反覆多次取其平均值，圖 4.7 為雷射位移感測實體圖。

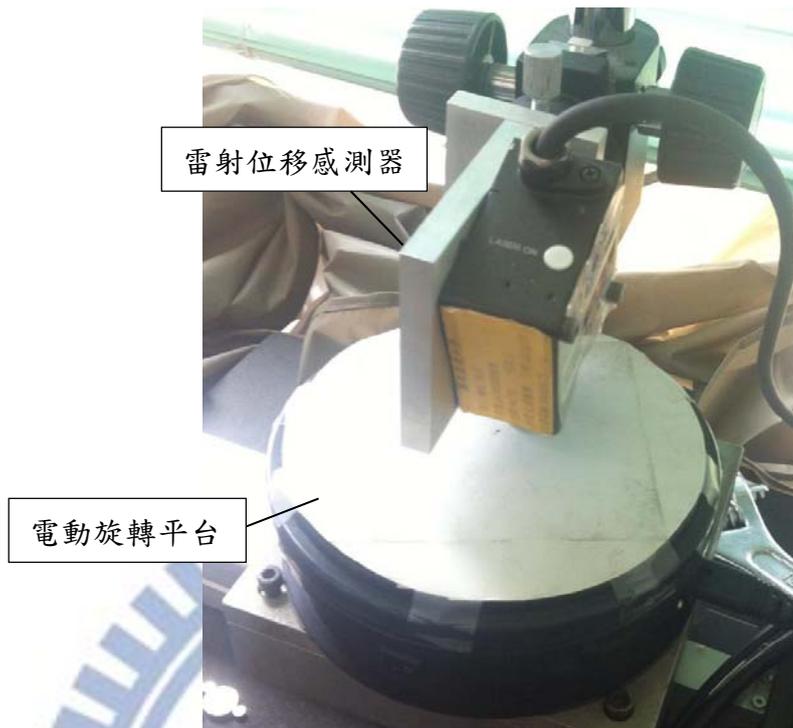


圖 4.7 雷射位移感測實體圖

4.2 有限元素模型

本研究採用有限元素軟體 Abaqus 進行有限元素分析。Abaqus 是一套功能強大的工程模擬軟體，具有整合式與自動化的前後處理器與解析功能，提供一非常直覺的介面，最符合設計人員、設計工程師及分析工程師的需求。其支援多項元素分析類型與材料性質，可進行線性與非線性的問題分析，並且在模擬中，Abaqus 能夠自動調整時間增量（Time Increment）與收斂公差，讓模擬結果更為準確及效率。

4.2.1 有限元素模型之基本假設

本研究之有限元素分析，將建立在以下幾個基本假設之上進行設定：

- (1) 視板材為一均質且具等向性性質之彈塑性 (elasto-plastic) 材料。
- (2) 不考慮模具及壓料板的變形，將其定義為剛體 (rigid body)。
- (3) 不考慮液壓成形機台之機械耗功。
- (4) 液壓室壓力考慮為均壓作用於板件。
- (5) 不考慮液壓油洩漏問題所造成的液壓室壓力變化。

4.2.2 建立模型

由於本研究之變形屬於非線性大變形問題，因此在做有限元素模擬分析時選用 Abaqus/Explicit 來進行求解。首先必須先建立模具與金屬板件之有限元素模型，由於二維有限元素模型在建構模具幾何外型時較難貼近現實，因此建構了三維的有限元素模型。由於本研究之板液壓模型本身具對稱性，故在模型建構時採用 1/4 對稱之模型，有限元素模型如圖 4.8 所示。

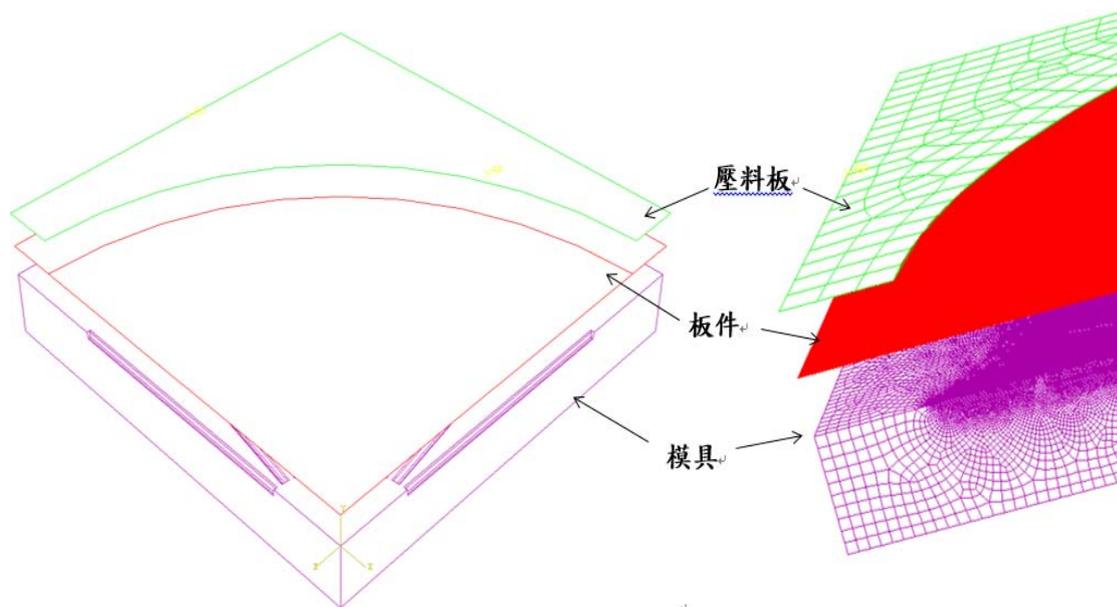


圖 4.8 有限元素模型

研究中使用殼元素（Shell Element）對板件進行模擬分析，用來模擬厚度遠小於其他方向尺寸，且沿厚度方向的應力可以忽略的結構。在金屬板件的部份，採用的是 S3 三角型殼元素，其為一般目的（General-Purpose）的殼元素，考慮了有限的大應變和任意大轉動，並允許厚度隨著元素的變形而改變。而在模具的部份則採用 R3D4 三維四邊型剛體元素，用來模擬三維剛體的表面。

金屬板件之材料性質則利用第三章所得之材料試驗結果，應用指數定律擬合塑性階段之真實應力－應變曲線，作為有限元素模擬時之金屬板材材料性質設定值，並定義材料為均質(Homogeneous)。

4.2.3 建立模型分析及邊界條件設定

建構完有限元素模型、材料參數及接觸設定後，接續需要設定

包括：分析步歷程及外力負載相關等。板液壓成形製程分為板件夾持與施加液壓兩步驟，首先給予壓料板一壓力作為夾持試片之用，夾持壓力依照實際液壓實驗之加持壓力所給定，如表 4.1。在給定夾持壓力後，接著施加一均勻壓力於金屬板件上，圖 4.9 為邊界條件施加示意圖。

表 4.1 液壓力與夾持壓力對照表

液壓力	100MPa	130MPa	150MPa	170MPa
夾持壓力	55 kgf/cm ²	70 kgf/cm ²	80 kgf/cm ²	88 kgf/cm ²

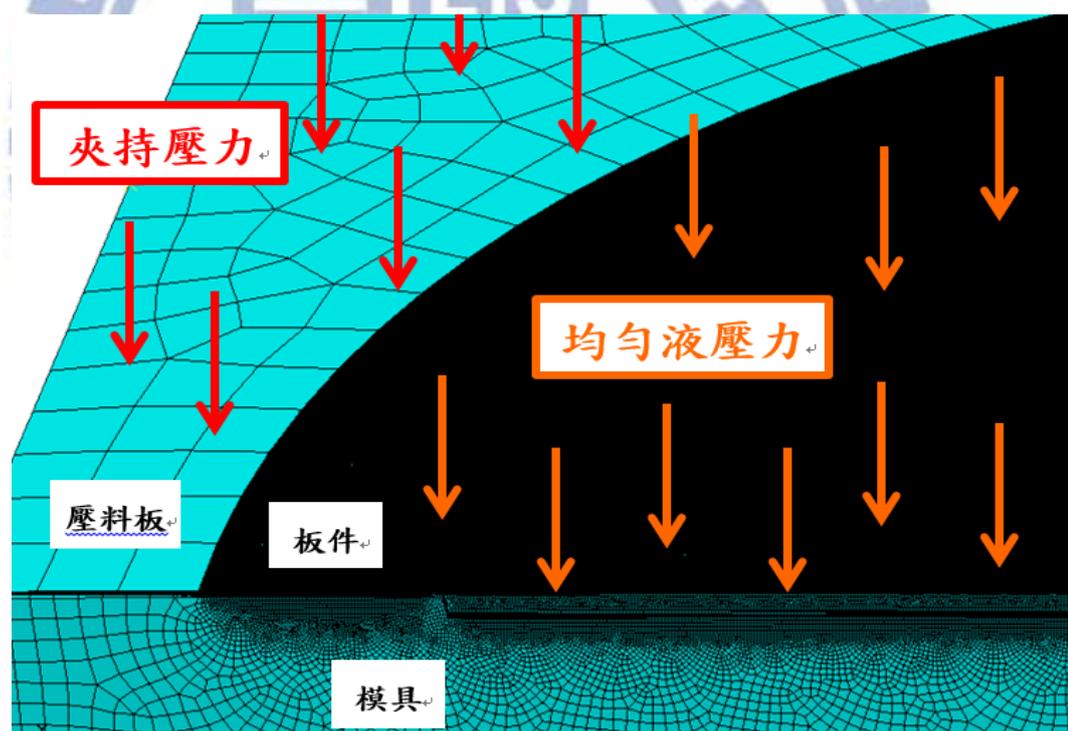


圖 4.9 邊界條件施加示意圖

4.2.4 網格收斂性測試

由於有限元素法原理為將變形體的無限自由度利用網格的劃

分，簡化為有限的自由度進行求解，因此若網格劃分的越細，元素數量越多，則模擬分析的結果將更準確，但也可能因此累積出數值誤差，且過多的網格往往將增加硬體的運算時間。所以為了兼顧模擬結果的準確性及運算效率，因此針對有限元素模型分別以網格邊長 0.1，0.07，0.05，0.03mm，選擇液壓力 100MPa 進行收斂性測試。

元素網格邊長與板件成形深度模擬結果如圖 4.11~4.14 所示，可以看出當網格邊長為 0.1mm 及 0.07mm 時，量測到的板材成形之流道深度分布並不均勻，到了網格邊長為 0.05mm 之後，量測到的板材成形之流道深度趨近一致，而由於當網格邊長為 0.03mm 時所需的時間過長，因此為了有效地縮短計算時間並得到具足夠準確性的模擬結果，後續之有限元素模擬選用網格邊長為 0.05mm 之網格尺寸對有限元素模型進行劃分。

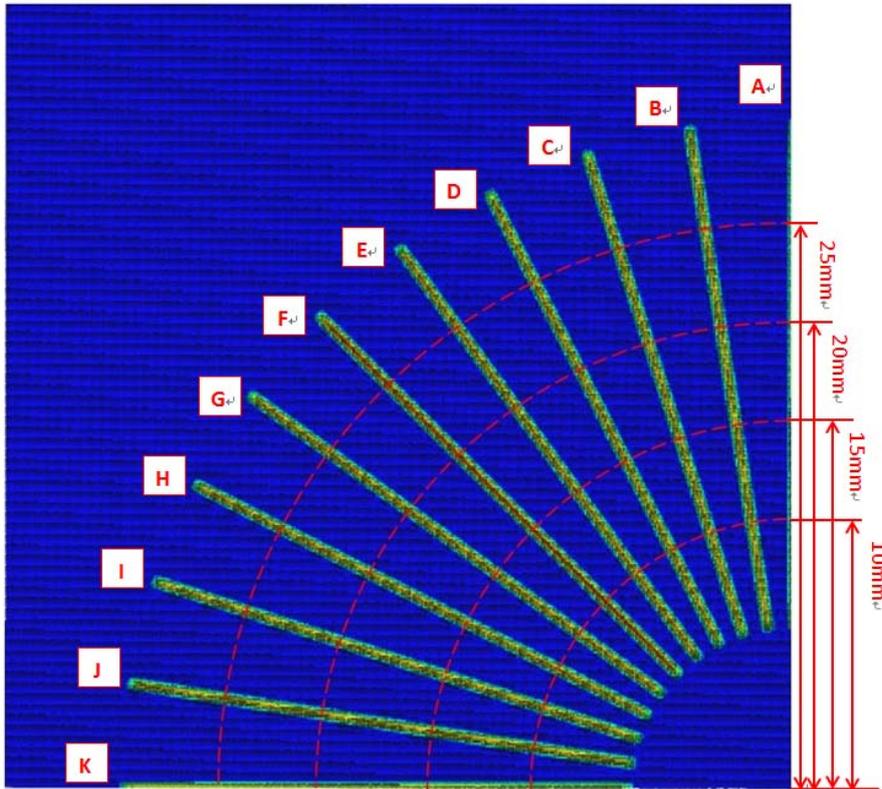


圖 4.10 流道編號及位置示意圖

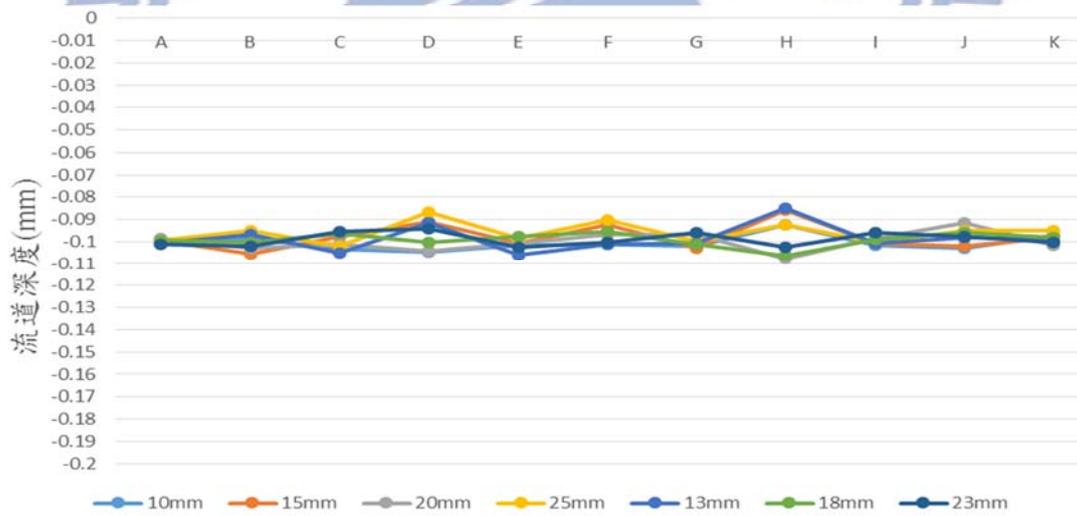


圖 4.11 網格邊長 0.1mm 之流道深度分布模擬結果

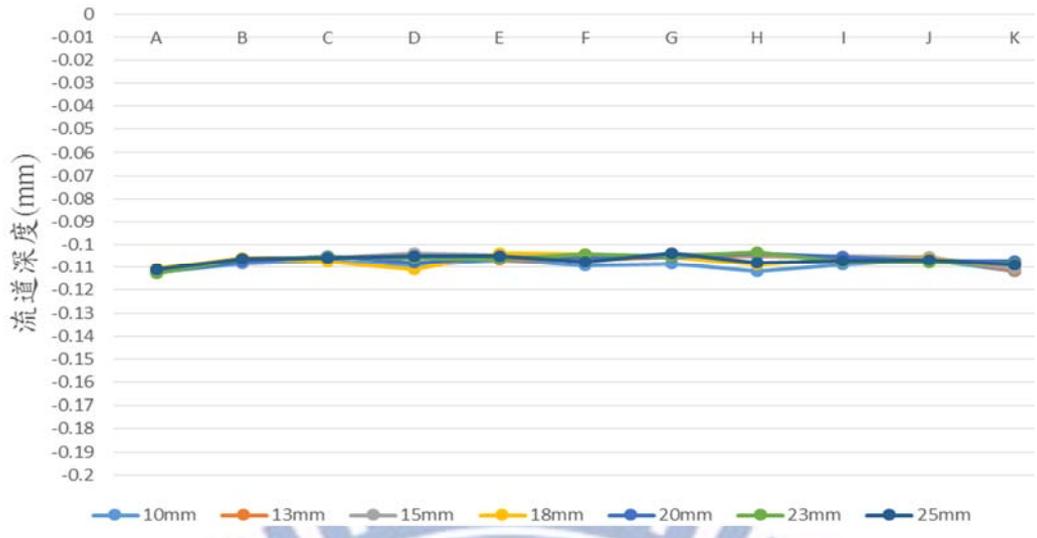


圖 4.12 網格邊長 0.07mm 之流道深度分布模擬結果

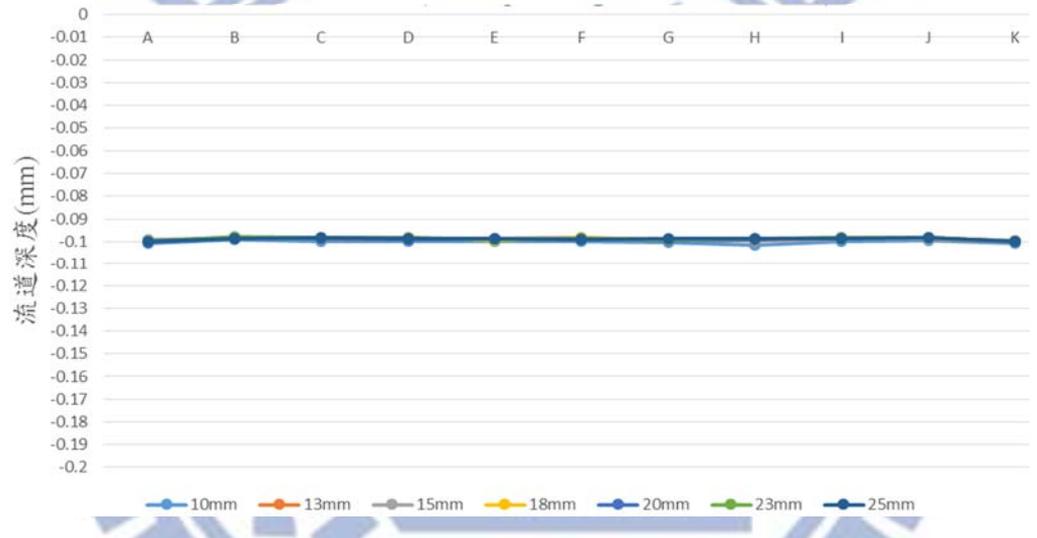


圖 4.13 網格邊長 0.05mm 之流道深度分布模擬結果

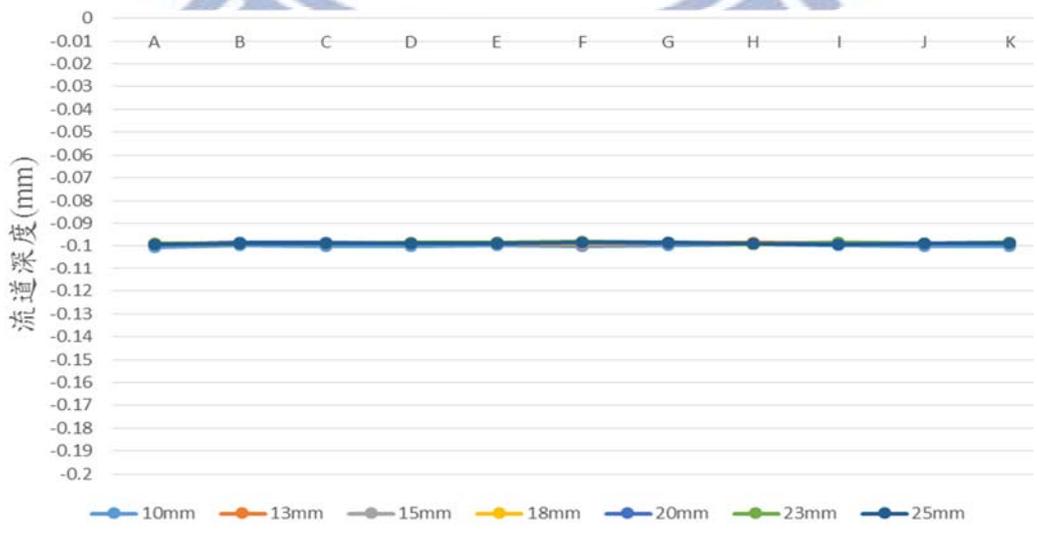


圖 4.14 網格邊長 0.03mm 之流道深度分布模擬結果

4.2.5 接觸設定

金屬成型過程中，板料與模具間之摩擦行為往往直接影響到板件成形的好壞，對於輻射狀微流道之液壓成形而言，板件與模具及壓料板與板件間之摩擦係數會直接關係著板件的流動性。一般認為，過大的摩擦力會阻礙材料的流動性，進而使板件破裂；過小的摩擦力則會使過多的材料流入模具中因此產生皺摺。而摩擦係數不易經由實驗量測，且會因模具與板件間之表面粗度、材料的選擇、磨潤情況等[18]因素影響。

由於不能確定模具與板件及壓料板與板件間確切的摩擦係數，因此將利用有限元素模型對其進行討論。首先對模具與板件討論，在假設液壓力 100MPa，壓料板與板件間沒有摩擦影響的情況下，分別使用摩擦係數 0.2、0.15、0.1 和 0.05，探討板件與模具間(圖 4.15)不同摩擦係數設定對板件成形之影響。

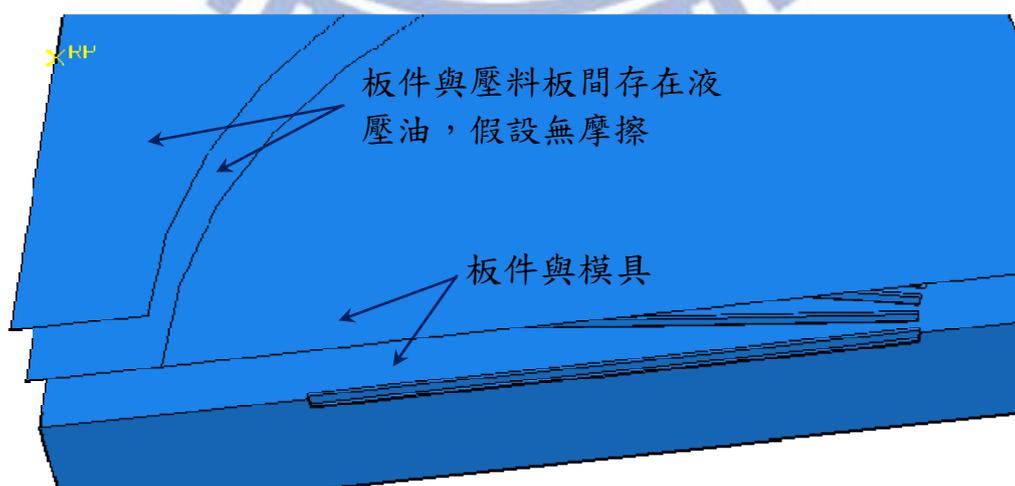


圖 4.15 有限元素模型摩擦係數之接觸對示意圖

板件與模具間不同摩擦係數設定之模擬結果比較如表 4.2 所示，可以看到當模具與板件之間摩擦係數改變時，板材成形後之最大應力值、平均流道深度以及板件厚度雖然有所差距但並不大。而由不同摩擦係數之模擬結果圖(圖 4.16~4.19)，則可以看出摩擦係數的不同亦不會影響到流道成形均勻性。在考慮以上結果後，設定有限元素模型之接觸設定時，模具與板件間之摩擦係數設為 0.1。

表 4.2 模具與板件間摩擦係數設定之模擬結果比較

板件與模具間 摩擦係數	最大應力值 (MPa)	平均流道深度 (mm)	板件厚度 (mm)
0.2	338.3	0.1008	0.1351
0.15	339.3	0.1010	0.1351
0.1	341.5	0.1008	0.1350
0.05	340.5	0.1003	0.1359

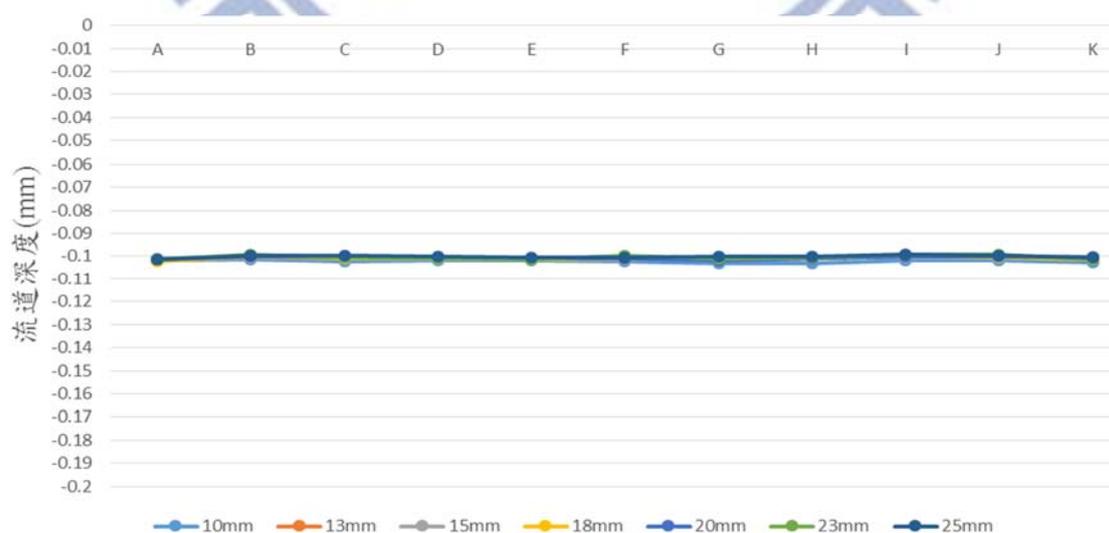


圖 4.16 模具與板件間摩擦係數 0.2 之流道深度分布模擬結果

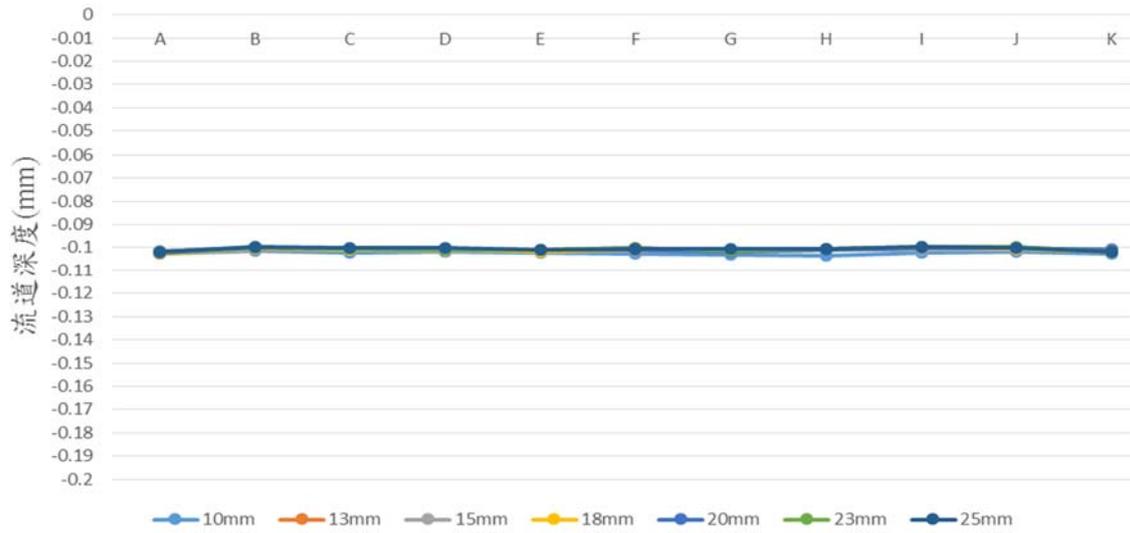


圖 4.17 模具與板件間摩擦係數 0.15 之流道深度分布模擬結果

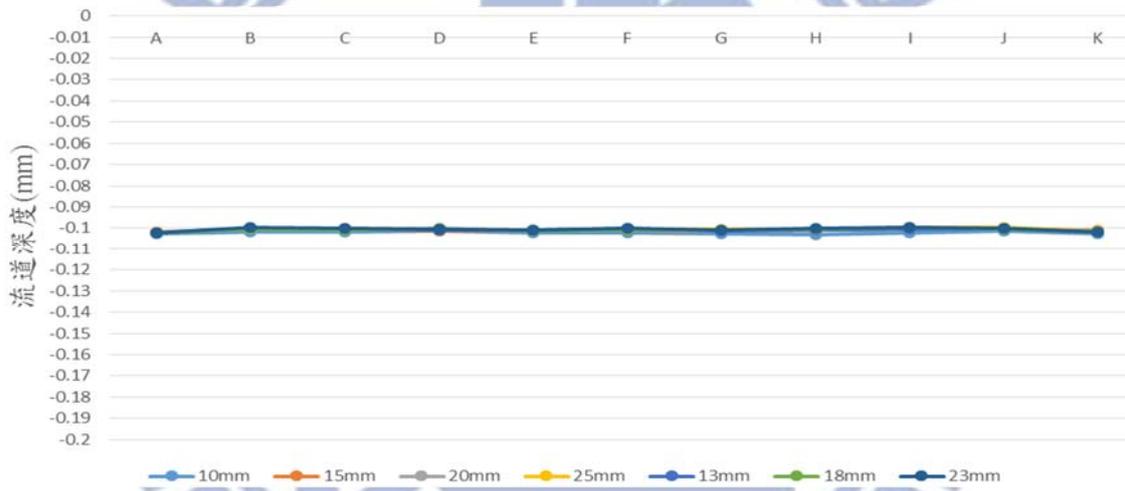


圖 4.18 模具與板件間摩擦係數 0.1 之流道深度分布模擬結果

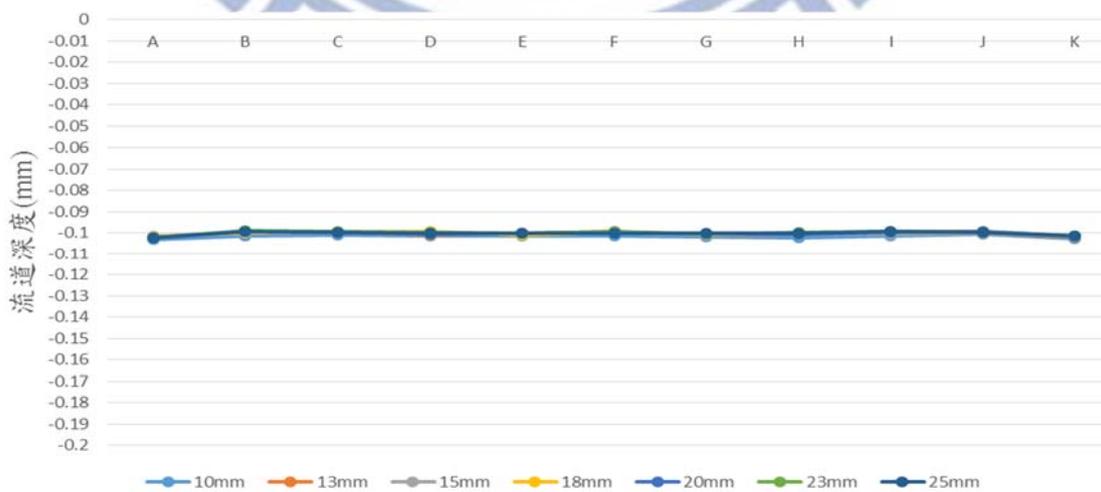


圖 4.19 模具與板件間摩擦係數 0.05 之流道深度分布模擬結果

在選定板件與模具間之摩擦係數後，接著討論壓料板與板件間之摩擦係數的影響。同樣假設液壓力 100MPa，設定板件與模具間之摩擦係數為 0.1，討論壓料板與板件間(圖 4.20) 無摩擦存在及存在有摩擦係數 0.1 對板件之影響。

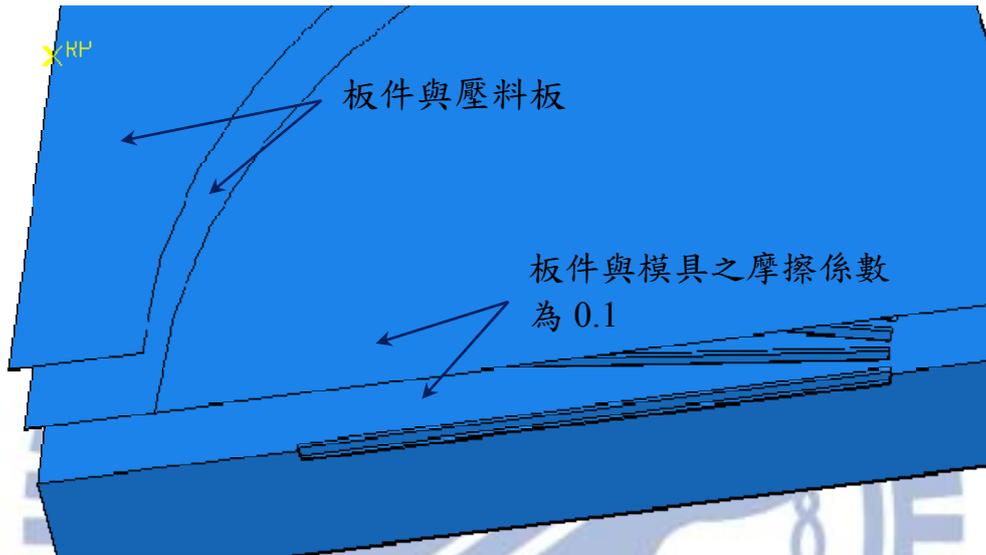


圖 4.20 有限元素模型摩擦係數之接觸對示意圖

壓料板與板件間不同摩擦係數設定之模擬結果比較表 4.3 所示，可以看到當壓料板與板件之間摩擦係數改變時，板材成形後之最大應力值、平均流道深度以及板件厚度沒有太大的改變，板材之成形幾乎沒有差別。由不同摩擦係數之模擬結果圖(圖 4.20~4.21)，則可以看出壓料板與板件間摩擦係數的不同亦不會影響到流道成形均勻性。在考慮以上結果後，可以假設在液壓成形時壓料板與板件間無摩擦影響。

表 4.3 壓料板與板件間摩擦係數設定之模擬結果比較

壓料板與板件 間之摩擦係數	最大應力值 (MPa)	平均流道深度 (mm)	板件厚度 (mm)
0.1	341.5	0.1008	0.1350
0	341.5	0.1008	0.1350

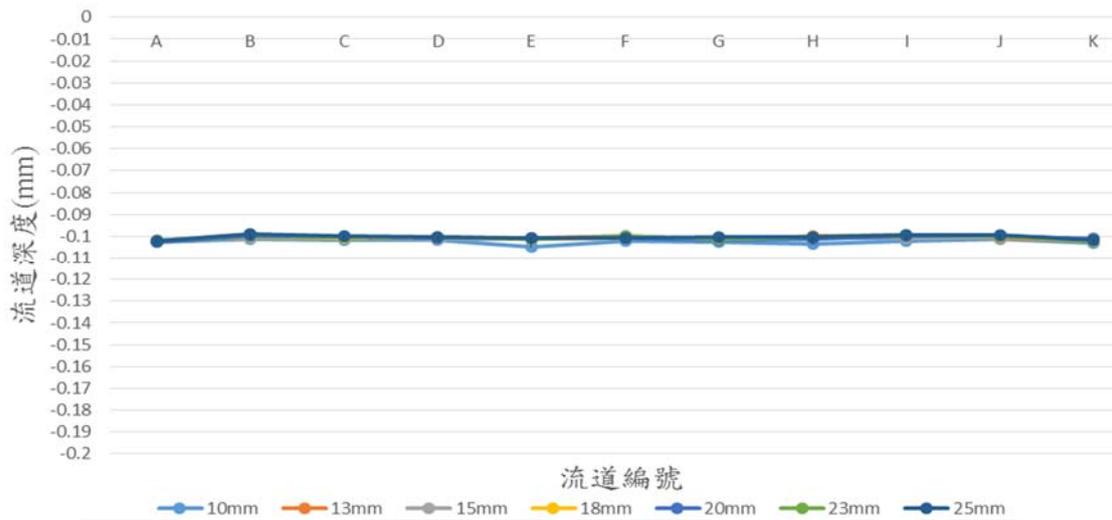


圖 4.20 壓料板與板件間摩擦係數 0.1 之流道深度分布模擬結果

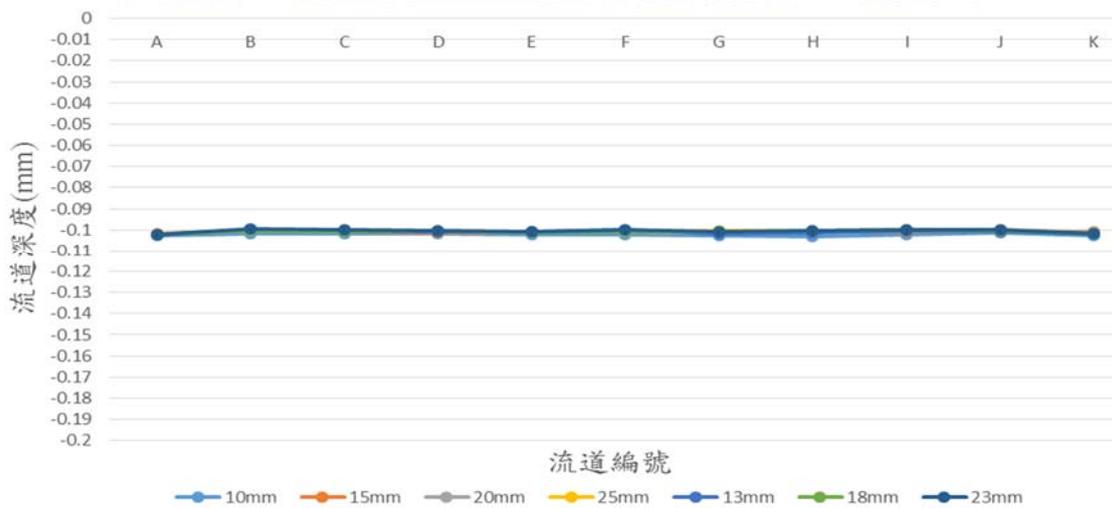


圖 4.21 壓料板與板件間無摩擦係數之流道深度分布模擬結果

4.3 有限元素模擬結果與實驗驗證

針對成形出平板式輻射狀熱管所需之最佳的輻射狀微流道，使用高液壓機台壓力分別以 100MPa、130MPa 和 150MPa 來進行成形，一共進行三次實驗，得到結果後接續以雷射位移感測器對已成形銅板之表面進行量測，以求得實驗成形板件流道之輪廓與深度。其成形後之試片如圖 4.22 所示，量測結果如圖 4.23、圖 4.24 及圖 4.25，壓力分別為 100MPa、130MPa 和 150MPa。可以由量測結果看出液壓成形出來之輻射狀微流道深度並沒有均勻性，甚至有相隔之流道一深一淺現象出現。但由有限元素模擬 100MPa、130MPa 和 150MPa 的液壓力成形結果可看出各微流道間的流道深度差異不大，顯示出液壓成形應具有良好的均勻性，且模擬所得之流道深度與實驗所得之流道深度有所出入。

模擬結果如底下圖 4.26、圖 4.27 及圖 4.28。實驗結果之輻射狀微流道深度有一深一淺的現象發生，推測應為模具之流道在製造時寬度不一致所造成，因此量測模具前 11 條流道寬度，如表 4.4 所示，再用量測到的流道寬度，以液壓力 100MPa 建立有限元素模型，由此有限元素模擬之結果發現，模具流道寬度不同相對應之流道深度亦有一深一淺的現象，如圖 4.29 所示。因此推測實驗所得之流道深度有一深一淺之現象，應為模具流道寬度不同所造成，因此後續重新製作做

新的模具並要求寬度精度在 $\pm 0.01\text{mm}$ 之內，以求成形出較佳之微流道。

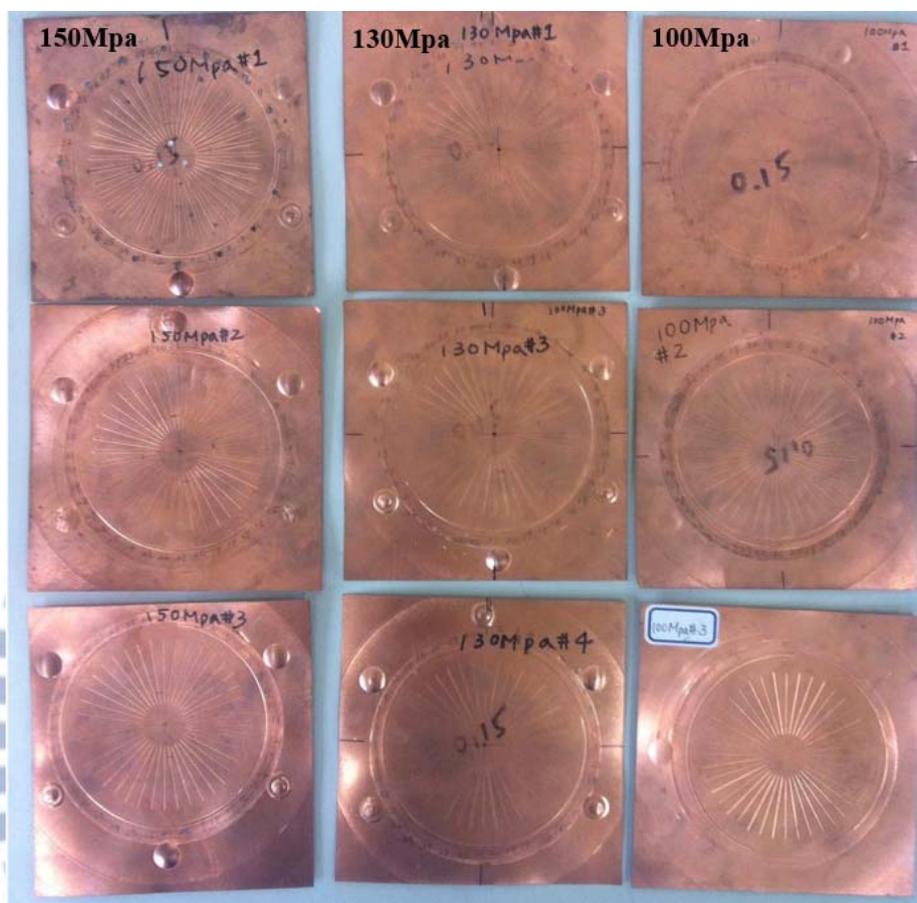


圖 4.22 不同液壓力成形出之輻射狀微流道



圖 4.23 液壓力 100MPa 成形實驗之流道深度分布結果

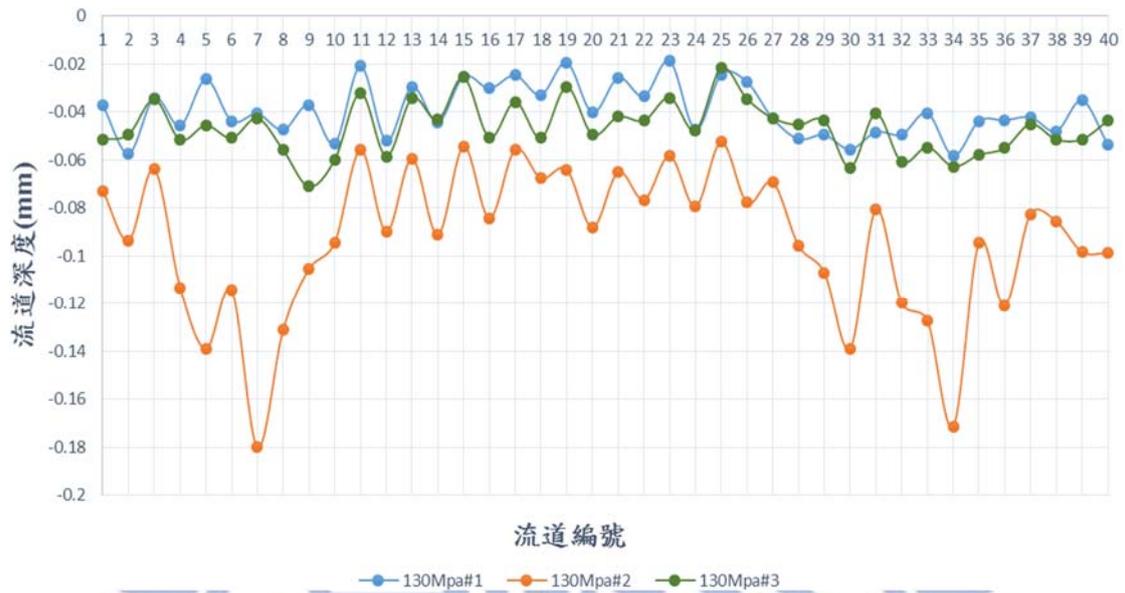


圖 4.24 液壓力 130MPa 成形實驗之流道深度分布結果

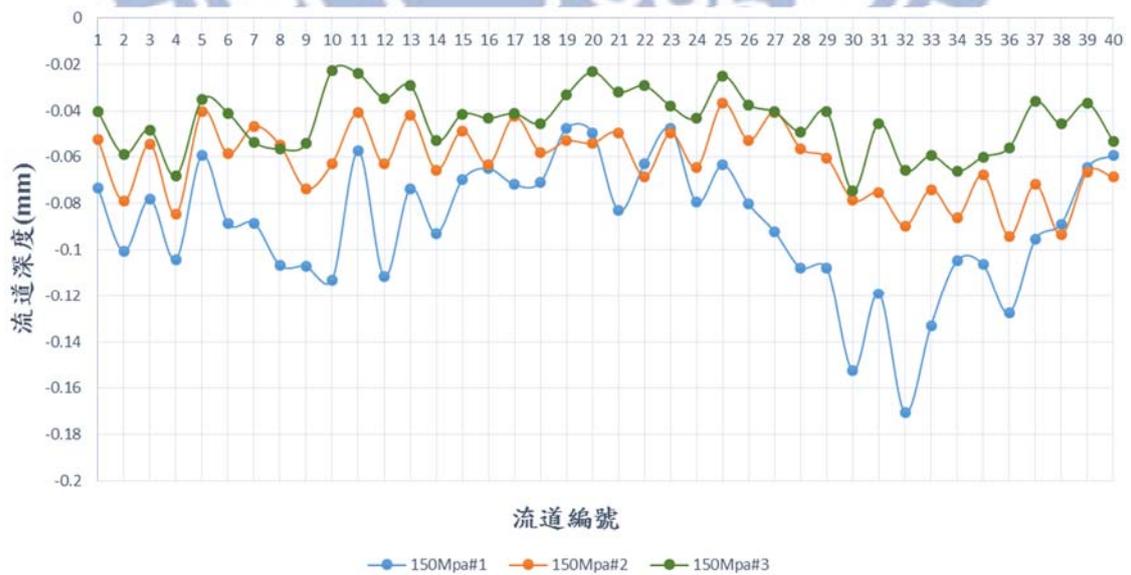


圖 4.25 液壓力 150MPa 成形實驗之流道深度分布結果

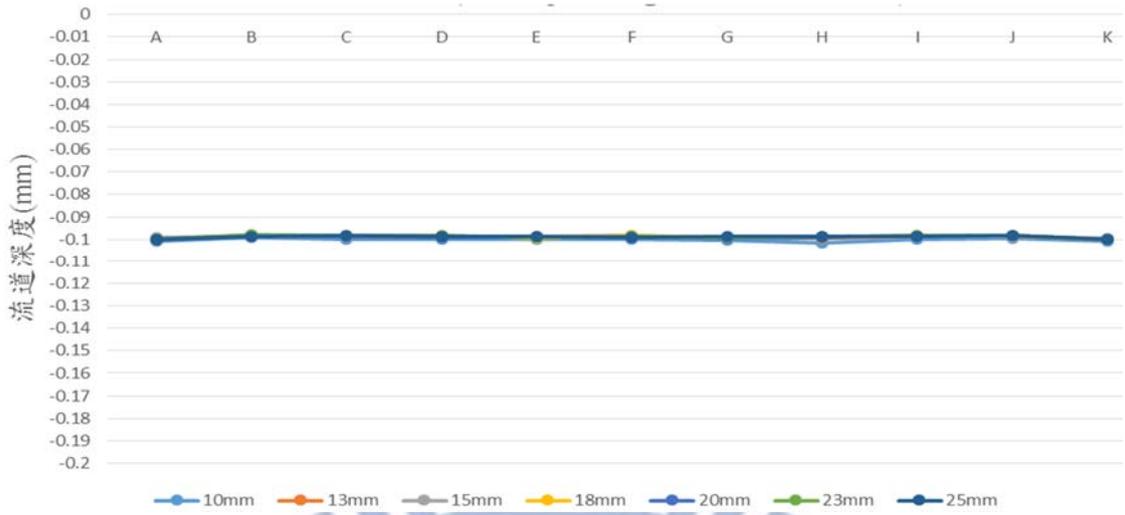


圖 4.26 液壓力 100MPa 模擬之流道深度分布結果

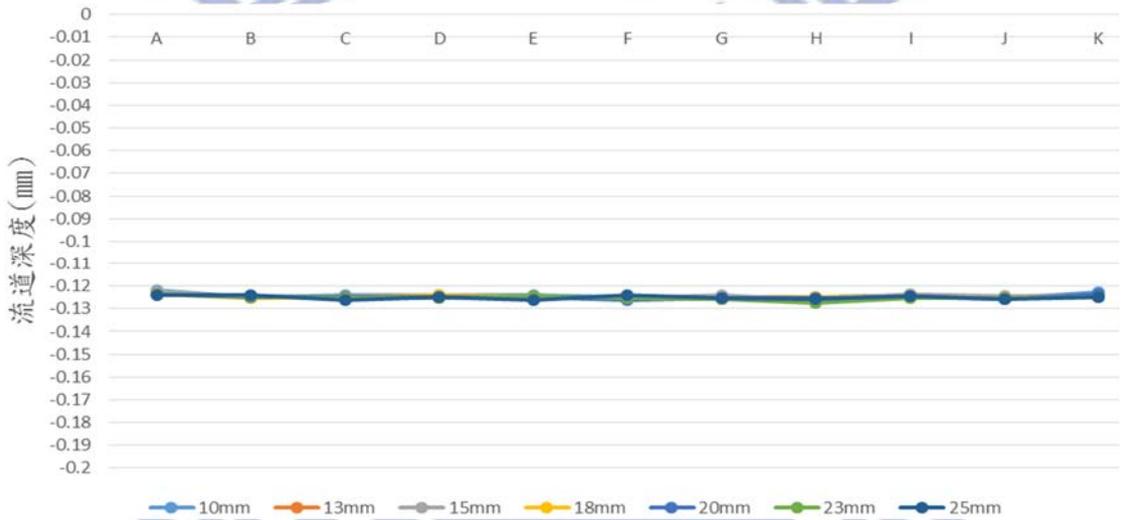


圖 4.27 液壓力 130MPa 模擬之流道深度分布結果

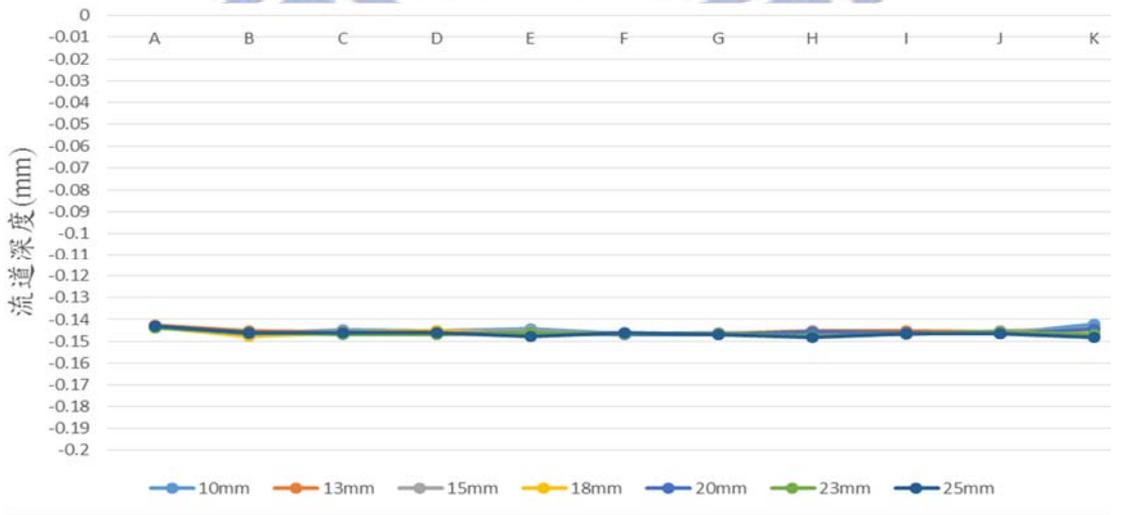


圖 4.28 液壓力 150MPa 模擬之流道深度分布結果

表 4.4 模具前 11 條流道寬度量測結果

流道編號	A	B	C	D	E	F
流道寬度 (mm)	0.563	0.532	0.555	0.524	0.560	0.547
流道編號	G	H	I	J	K	
流道寬度 (mm)	0.583	0.551	0.555	0.538	0.582	

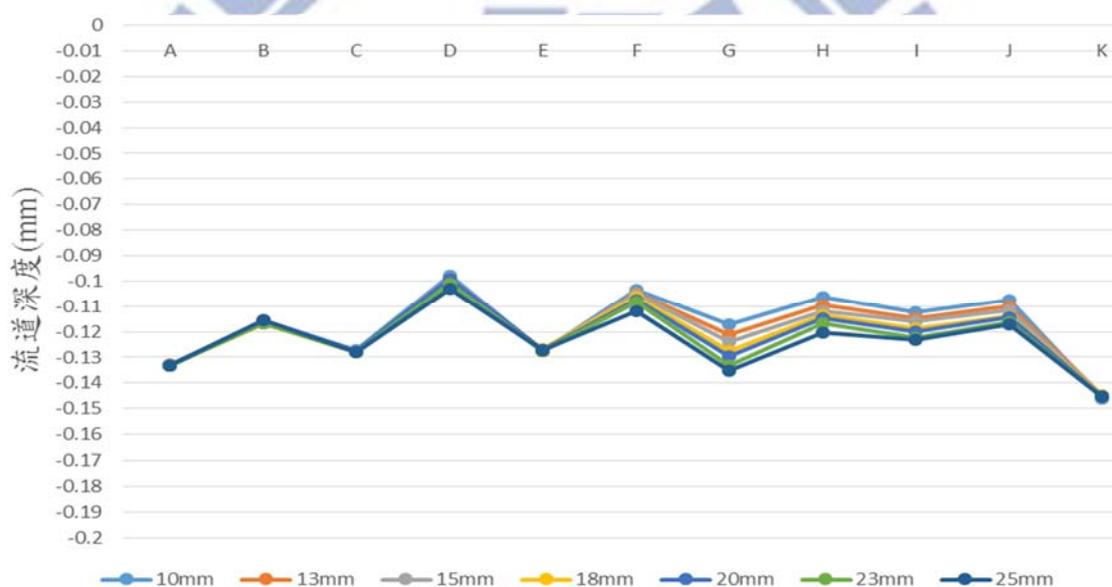


圖 4.29 液壓力 100MPa 按實際流道寬度之流道深度分布模擬結果

由於模具製作上的困難，因此重新製作後的模具流道寬度之精度無法控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 之內，40 條流道中仍有 10 條流道寬度過窄，因此對模具內所有的流道進行量測。且由於先前之實驗結果與模擬結果所得之流道深度有所出入，無法比較有限元素模形與實際實驗，因此依實際研究過程與實驗結果以及量測到的模具流道寬

度，重新建立一完整包含所有流道之有限元素模型。因為由前面的液壓實驗結果發現，液壓力 100MPa、130MPa 和 150MPa 成形實驗流道深度分布結果並未達到預期效果，因此之後的液壓實驗只以 100MPa 之液壓力驗證模擬與實驗結果是否一致，接著便以 170MPa 之液壓力成形輻射狀微流道，其有限元素模擬結果如圖 4.30、圖 4.31 所示，圖中 100-15mm、100-20mm 及 100-25mm 分別代表液壓力 100MPa 時距模具中心 15mm，20mm 及 25mm 之流道深度，液壓力 170MPa 以此類推，成形後之試片如圖 4.32 所示，量測結果如圖 4.33、圖 4.34 所示，另外，在量測流道深度時是量測流全長中間部分之深度，因此模擬結果也以同樣區塊(距板材中心 15mm)之流道深度與實驗結果比較，且模擬之流道編號也是與實驗結果相對應之流道編號，如圖 4.35、4.36。由模擬及實驗結果皆可以發現，除了模具流道較窄及較寬相對應成形的流道較淺及較深外，其餘之流道深度差異不大，可看出其均勻性，但模擬所得之流道深度與實驗所得之流道深度仍舊有所出入(圖 4.35、圖 4.36)，目前仍在分析差異之原因。



圖 4.30 液壓力 100MPa 之新模具流道深度分布模擬結果

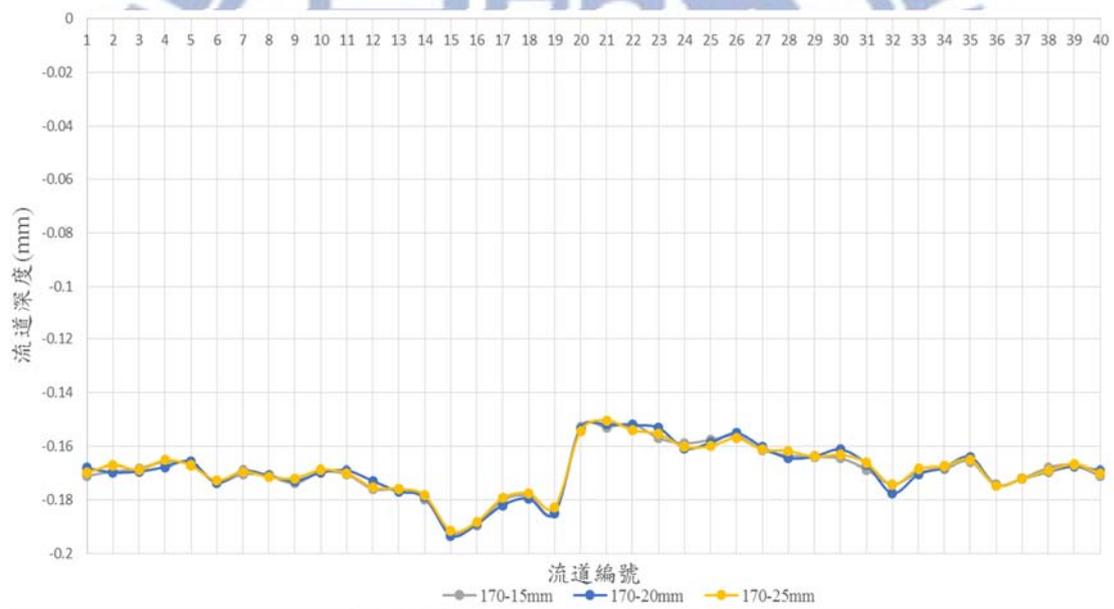


圖 4.31 液壓力 170MPa 流道深度分布模擬結果比較(新模具)

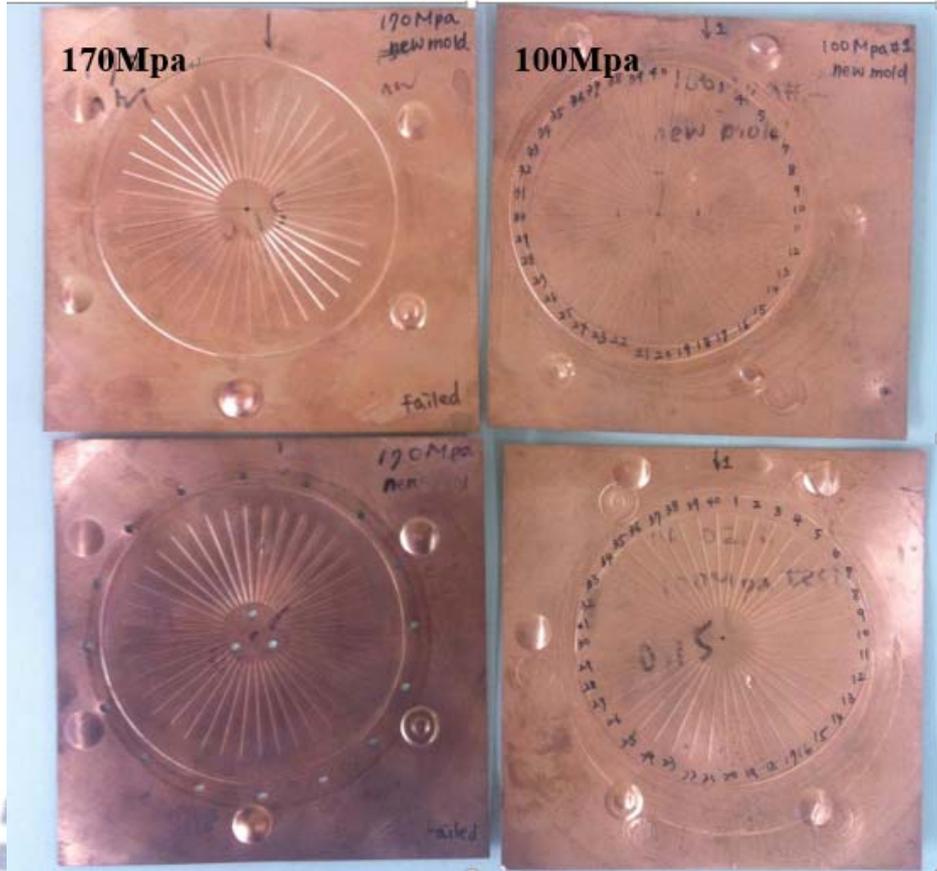


圖 4.32 不同液壓力成形出之輻射狀微流道(新模具)



圖 4.33 液壓力 100MPa 流道深度分布實驗結果比較(新模具)

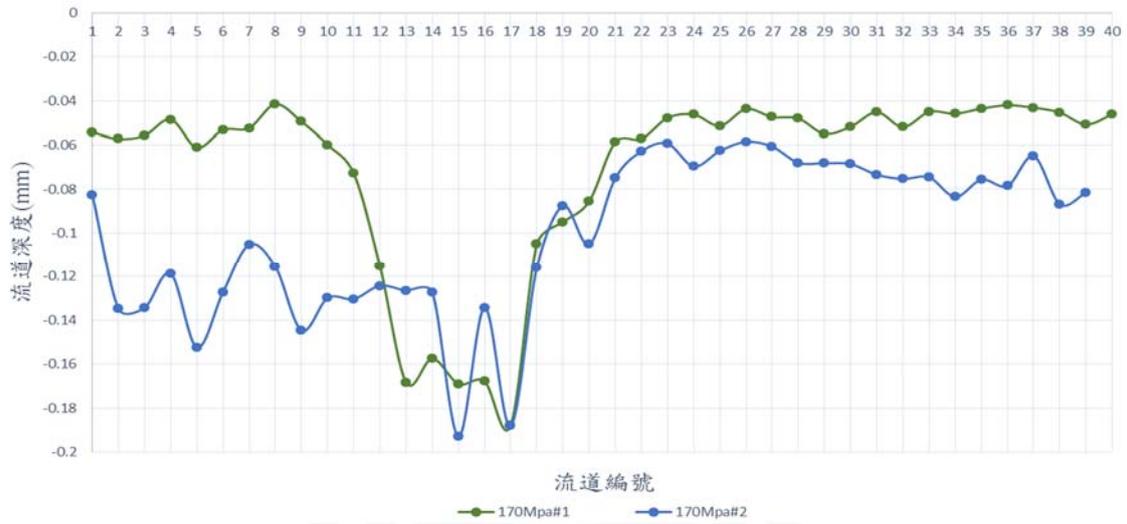


圖 4.34 液壓力 170MPa 流道深度分布實驗結果(新模具)

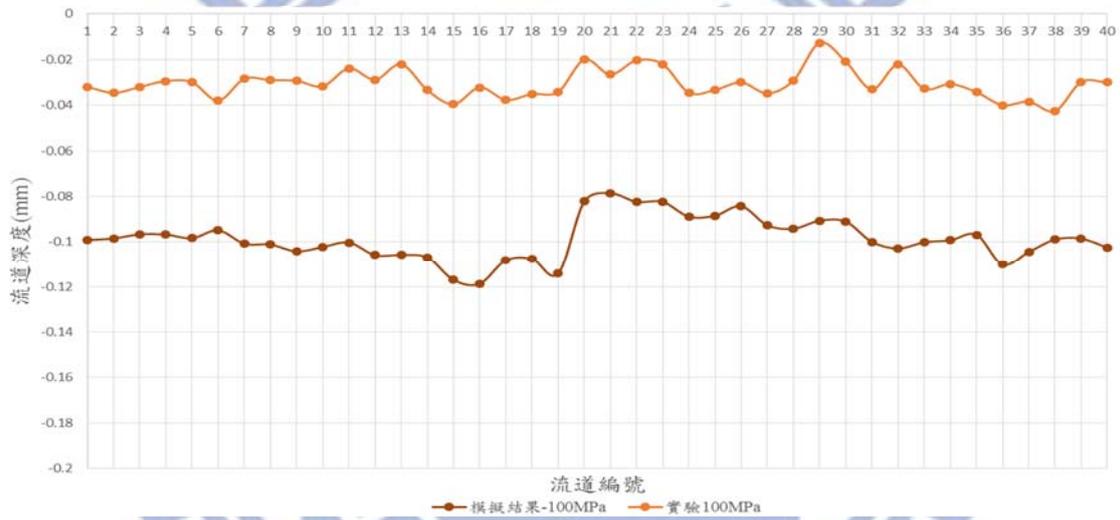


圖 4.35 液壓力 100MPa 流道深度實驗結果與模擬結果比較(新模具)

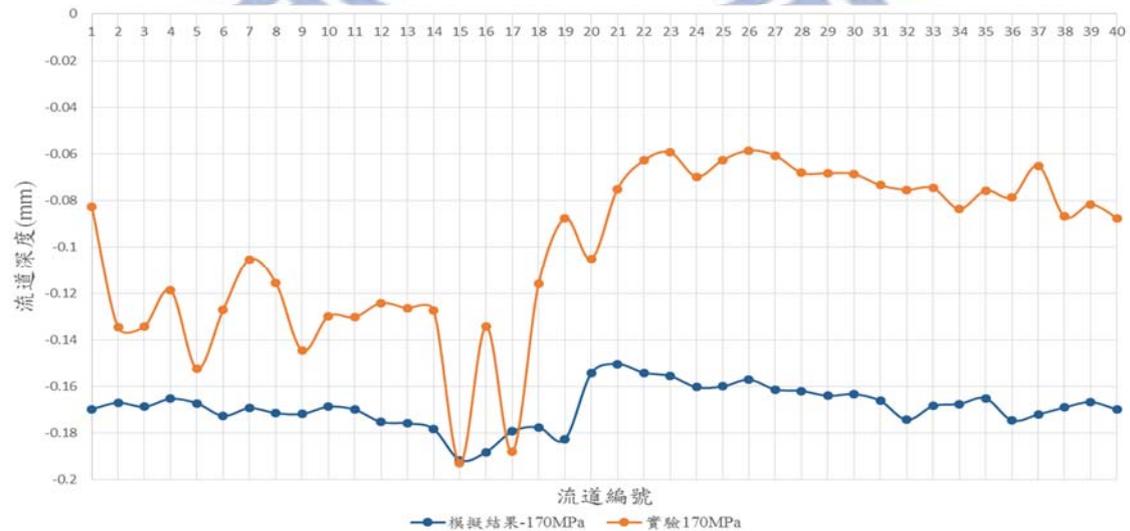


圖 4.36 液壓力 170MPa 流道深度實驗結果與模擬結果比較(新模具)

4.4 小結

本章利用液壓成型機台進行實驗，並利用有限元素模型預測輻射狀微流道之成形，以決定液壓成型參數。在成形出輻射狀微流道之後，經由量測輻射狀微流道將所得之實驗結果與有限元素模擬結果進行比較。在量測輻射狀微流道後發現各微流道的深度會因液壓成形時相對應模具之流道寬度不同而有深淺不同的情況發生，而在有限元素模擬結果也同樣可以發現此現象，驗證了本研究所建立之有限元素模型可以有效預測輻射狀微流道之成形趨勢。但在輻射狀微流道之流道深度部分，實驗結果與有限元素模擬結果卻有所出入，目前仍在分析差異原因。後續將利用本章以液壓力 170MPa 所成形出之輻射狀微流道，組裝平板式熱管輻射狀微流道做熱性能實驗及實際應用在 LED 之散熱上。

第五章 熱管之熱性能實驗與 LED 燈實測

本研究應用高液壓技術成形出平板式熱管輻射狀微流道之毛細結構，而欲了解此平板式熱管之實際效能，則需建置熱管測試實驗設備，並將成形後之輻射狀微流道完成組裝，注入工作流體，透過此熱性能實驗探討不同工作流體填充率之熱管效能，最後實際應用在 LED 燈進行散熱試驗。

5.1 熱管設計與製作

熱管有許多不同的型式，基本上是由工作流體、密閉容器和毛細結構三要素所構成，本研究使用液壓成形之輻射狀微流道做為熱管毛細結構，因此此性能實驗的重點在密閉容器的設計與容器的真空度，以及工作流體的選用與填充。

5.1.1 密閉容器

本研究之平板式熱管由四部分組成，分別為上蓋板、中間框架、液壓成形之輻射狀微流道及下底座，如圖 5.1。上蓋板材料使用壓克力，中間框架及下底座皆使用純銅作為材料，容器尺寸設計時需配合液壓成形之輻射狀微流道分布為直徑 60mm 的圓板面積，因此尺寸設計為直徑 80mm 之圓形面積，並於容器四周配置 16 個直徑 2mm 的螺孔，作為各部分組合之用，各部分的詳細尺寸請見附錄

A。其中上蓋板上攻有直徑 10mm 的螺牙，並鎖入可供抽氣之閥門。中間框架厚度為 0.5mm，中間切去與微流道分布面積直徑 60mm 之圓形面積，並搭配一直徑 14mm 之圓形中墊片。下底座的正中央利用銑床銑出面積為直徑 60mm 深度為 0.3mm 的圓形溝槽，作為置入液壓成形微流道之結構，並於下底座背面鑽有直徑為 1.6mm 的圓孔，使下底座能放置熱電偶以量取溫度。

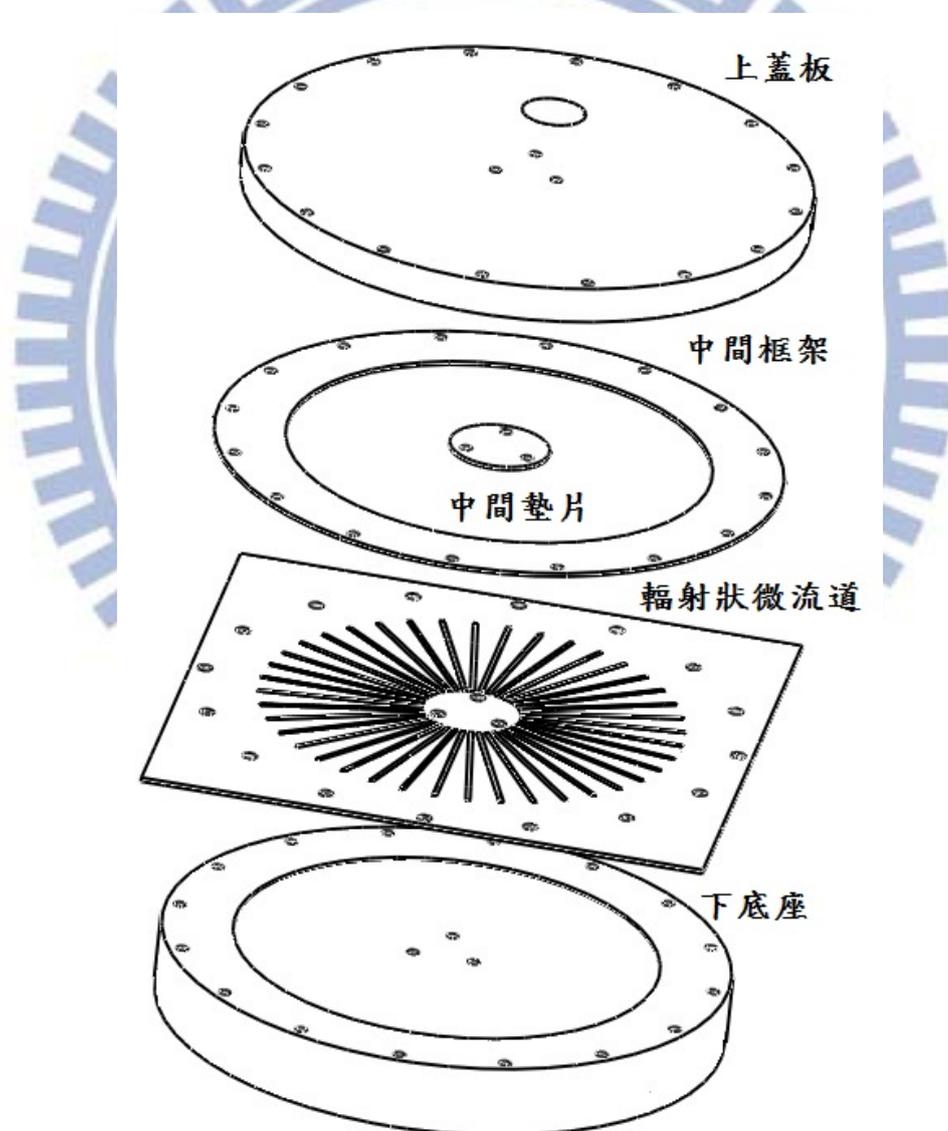


圖 5.1 平板式熱管組成圖

5.1.2 容器組裝與氣密性

首先，於加工完成的上蓋板、中間框架、下底座與液壓成形之微流道，組裝接觸部分皆塗上真空膠並以加以密封，增加其氣密性，並在下底座置入輻射狀微流道的溝槽內塗上散熱膏，使下底座和輻射狀微流道銅板能夠緊密接觸，順利的導熱。使用的散熱膏工作溫度 $-30^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，熱傳導率 $>4.6\text{ W mk}^{-1}$ 。最後將這四部份元件依序堆疊並對準螺孔，鎖上 M2 鋼質螺栓，如圖 5.2，如此便完成平板式熱管容器之組裝，組裝完成後將液壓成形之輻射狀微流道銅板多餘的地方切除，以利實驗的進行。



圖 5.2 組裝完成之平板式熱管

組裝好之平板式熱管需確認內部容器的氣密性，利用上蓋板上的閥門接上真空幫浦(圖 5.3)抽真空，內部壓力由真空計顯示可抽至 5.0×10^{-2} torr，如圖 5.4，接著關閉熱管上蓋板之閥門使容器內維持真空。因無法直接量得容器內部壓力，使用間接的方式以確認其氣密性。關閉幫浦之後因真空計接至熱管之間的管路會洩漏氣體，使壓力緩緩上升，首先確認管路的洩漏速度，因此先關閉熱管的閥門，經過測試在靜置 24 小時之後，壓力上升至 10.3 torr，另一個為管路加熱管的洩漏速度，維持熱管的閥門為開的，使熱管與管路是開通的，一樣靜置 24 小時後，壓力讀出為 10 torr，由洩漏的速度來看，氣體的洩漏處應是集中在管路之間，熱管本體有好的氣密性，可提供一個良好的密閉空間。



圖 5.3 真空幫浦與真空度計

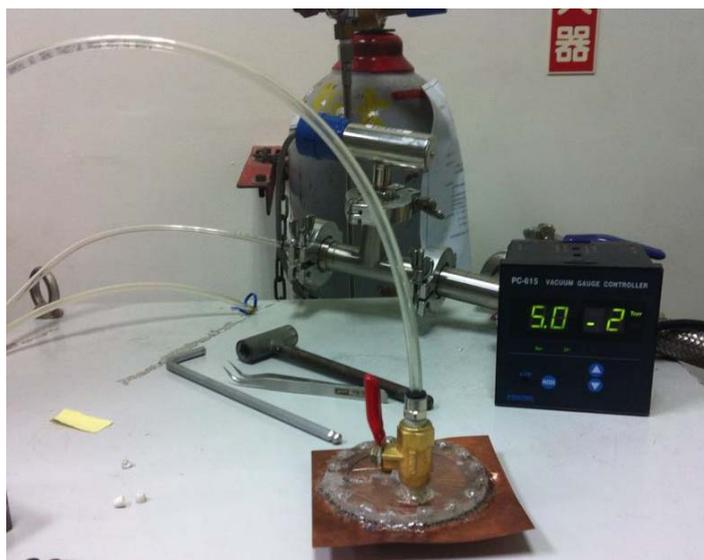


圖 5.4 熱管真空度

5.1.3 工作流體選用與填充

工作流體的選用需考慮熱管的用途、操作溫度、管容器與毛細結構的相容性等條件。本研究選用純水(RO 逆滲透純水機取得)為工作流體，因為水與熱管材質銅不會發生反應，會與熱管材質產生化學反應的材質是不能採用的，會降低熱管的壽命，且針對 LED 燈之散熱，水為符合其操作溫度範圍之工作流體，選擇在操作溫度範圍內之流體，才能使其順利在熱管內部進行蒸發與凝結。

工作流體的填充率，先利用計算可得知熱管內部容積，經過計算後流道容積約為 48.21 mm^3 ，氣體間隙容積為 1336.75 mm^3 ，接著依照不同的填充率計算出需要填入水的量，以填充率 30% 為例，所需填入水的量為總容積 $1384.96 \times 30\%$ 約為 415.5 mm^3 ，換算成容積約為 0.416 毫升。本研究將針對 30%，50% 與 70% 之三種填充率來

討論。填充的方法，先利用上蓋板上的閥門接上真空幫浦抽氣，待真空度達 5.0×10^{-2} torr 以下時，將準備注入流體之細針插入抽氣軟管中，接著關閉真空幫浦並鬆開細針軟管之開關使水導入熱管中，最後關閉上蓋板上的閥門，使其內部產生一個密閉狀態，就完成熱管的填充工作。

5.2 熱性能實驗

5.2.1 實驗設備

實驗設備為進行平板式熱管熱性能實驗時所需的加熱系統、冷凝系統及數據截取系統，主要架構是使用電源供應器接加熱片提供熱源，接著使用恆溫冰水機做散熱，並使用熱電偶量測溫度，整體量測架設示意圖如圖 5.5，實際裝置照片如圖 5.6。以下詳細說明各設備的規格與型號。

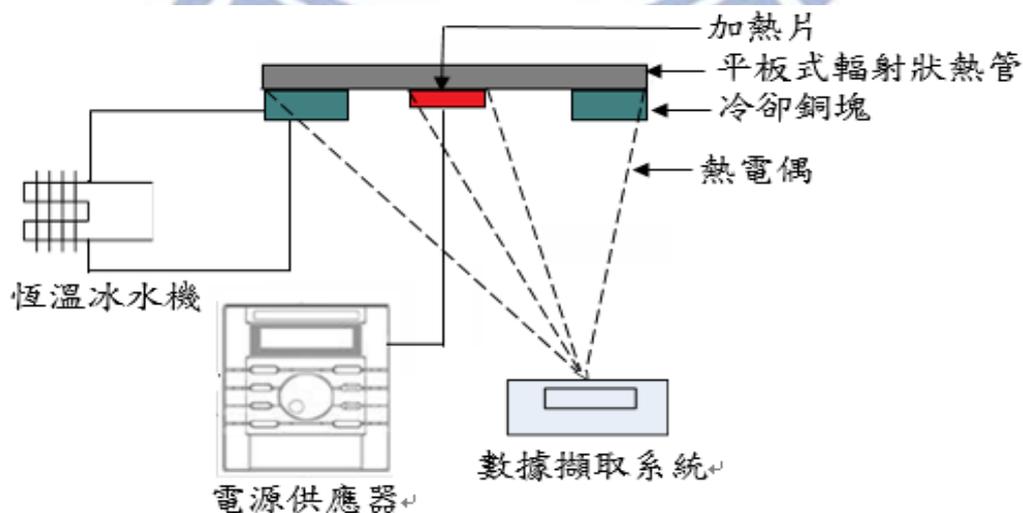


圖 5.5 熱管量測架設示意圖

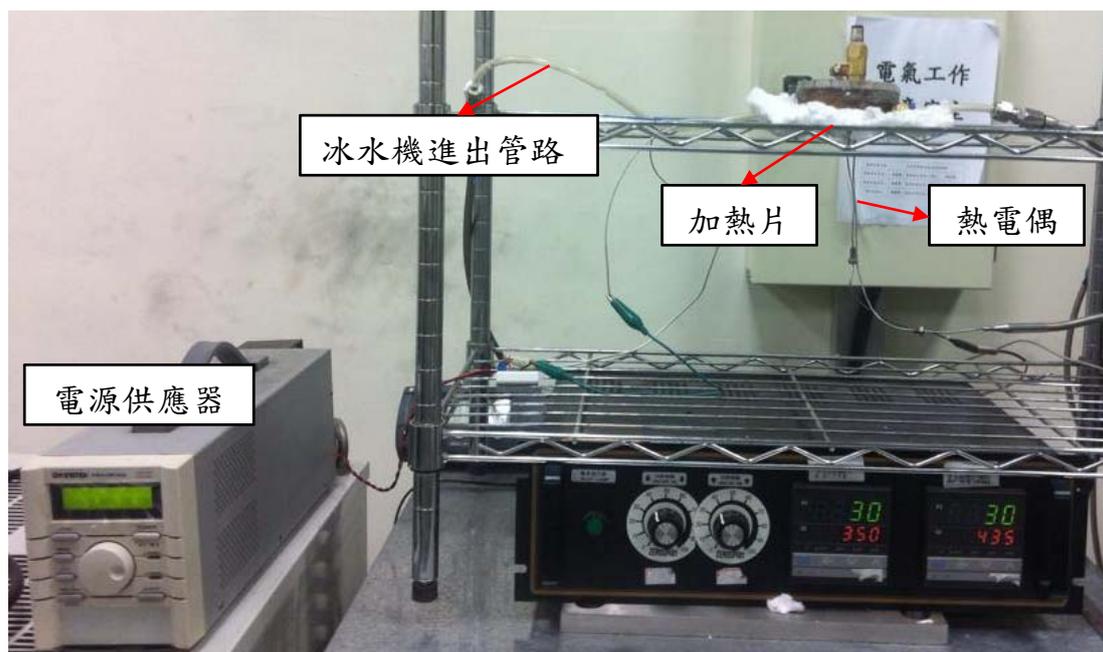


圖 5.6 實際裝置照片

加熱片使用頂赫興業軟質矽膠電熱片，面積大小為及 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ，電阻值為 4.3Ω ，詳細規格見附錄 B，並使用電源供應器調整電壓，來控制加熱片輸出功率。電源供應器(PSH-3610A)輸出電壓範圍 $0\sim 36\text{V}$ ，精度 0.005V ，最大作業頻率 6.7Hz ，如圖 5.7。



圖 5.7 電源供應器

冷凝系統使用哈柏精密工業有限公司恆溫冰水機(圖 5.8)連接冷卻銅塊，將銅塊中間挖空讓恆溫冰水機的冷卻水流入來進行冷卻，冷卻銅塊的尺寸為直徑 80mm 中間挖空直徑 60mm 之圓形銅塊，而流道部截面積為一 5mm ×5mm mm 的方孔，如圖 5.9。



圖 5.8 恆溫冰水機



圖 5.9 冷卻銅塊

溫度數據量測使用熱電偶(K-type thermocouple)插入熱管下底座設計的插孔，以截取溫度數據。而絕熱方面，使用絕熱棉將熱管外圍包覆起來，與外界隔絕，將熱損失降至最低以減少實驗誤差，如圖 5.10。

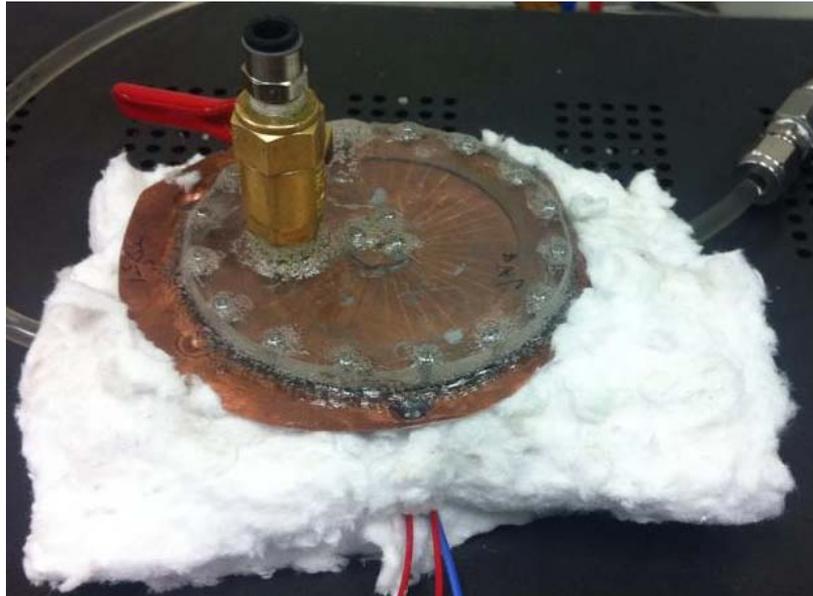


圖 5.10 絕熱棉包覆圖

5.2.2 熱管性能測試步驟

本研究將進行不同填充率、不同流道深度及不同工作角度平板式熱管輻射狀微流道性能測試。熱阻值為單位熱傳量下蒸發段與冷凝段溫度差，因此需量測出蒸發段溫度及冷凝段溫度並記錄輸入功率之值，為了確保每次量測熱管性能的條件皆相同，每次實驗皆依照下列量測步驟：

- (1) 將加熱片塗佈導熱膠黏貼於熱管上，冷卻銅塊以螺絲鎖緊貼合於熱管上，確保熱量的傳遞。加熱片及冷卻銅塊外面和絕熱部分再以絕熱棉包住，使熱量損失減至最少。
- (2) 用水平儀確定熱管是否水平放置
- (3) 將加熱片連接電源供應器，冷卻銅塊連至恆溫冰水機，並

將熱電偶插入下底座插孔。

- (4) 打開恆溫冰水機，調整溫度維持 25°C 。調整電源供應器輸入功率，本實驗功率由 2W 開始記錄，每次增加 2W 的輸入功率，直到 30W，每次增加輸入功率後，等到系統到達穩態後記錄熱電偶量得之數據，再繼續增加輸入熱量的瓦數，判斷到達穩態的條件為五分鐘內溫度訊號不再變化。
- (5) 待測試完成紀錄每個功率之溫度數據後，填入不同填充率之水，重複以上步驟。

5.3 熱性能實驗結果

熱性能實驗針對不同填充率(30%、50%、70%)進行測試，使用熱阻抗作為熱性能評估的主要指標，其次以蒸發段之溫度高低來判斷熱管是否有效的降低蒸發段的溫度。

熱管內工作流體之填充率是決定熱管熱性能的重要因素之一，工作流體的填充率會存在一個最佳值或範圍。為了比較不同填充率之熱性能，將實驗數據作成蒸發段與冷凝段之溫度差對輸入功率的關係圖，圖中可以發現，填充率 70%的熱阻抗最小，熱管傳熱效果最佳，然後填充率 50%次之，接著是填充率 80%，最後是填充率 30%，如圖 5.11。由圖中可以發現在填充率由 30%~70%時，隨著填充率增加，熱阻越小，熱傳效果越好，但到了填充率 80%時，熱

阻卻變大熱傳效果降低，推測應為填充過多的工作流體會使的熱管無法藉由其相變化來傳熱。

另外在圖 5.11 中還有一組純真空無填充工作流體的數據，可對照熱管無作用時的效能，有此組對照數據，可以確定在 30%、50% 及 70% 的填充率下，熱管是藉由填充水的向變化順利的運作。另外一個評估的指標為蒸發段之溫度高低，如圖 5.12，可以得到一樣的結果，填充率 70% 時熱管蒸發段的溫度降的最低，其次為填充率 50%，接著是填充率 80%，最後是填充率 30%。而後續 LED 燈散熱實驗將以填充工作流體 70% 之熱管來進行實驗。

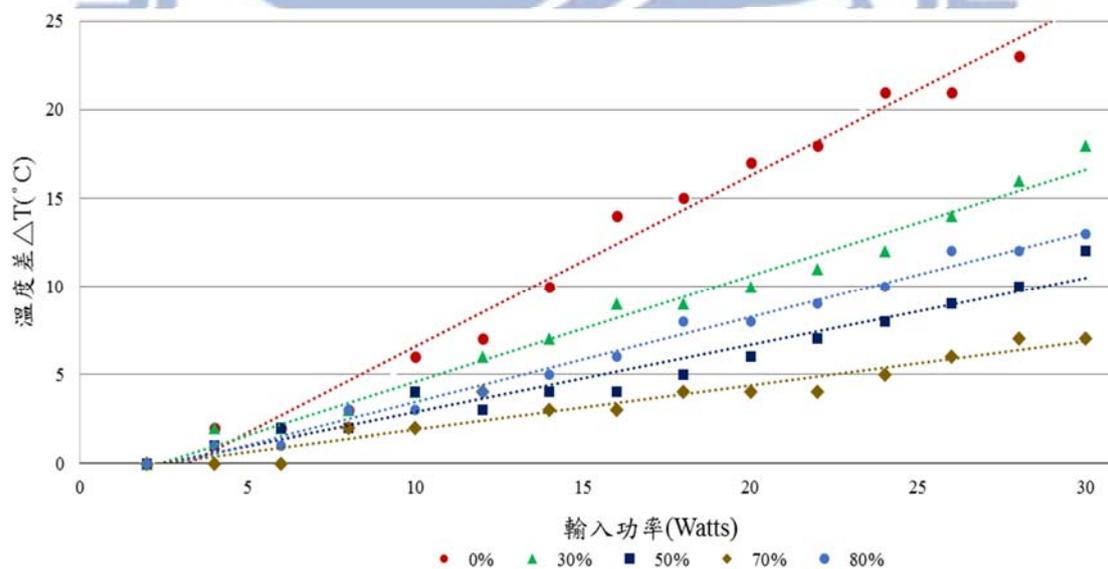


圖 5.11 不同填充率熱管蒸發段與冷凝段之溫度差對輸入功率關係圖

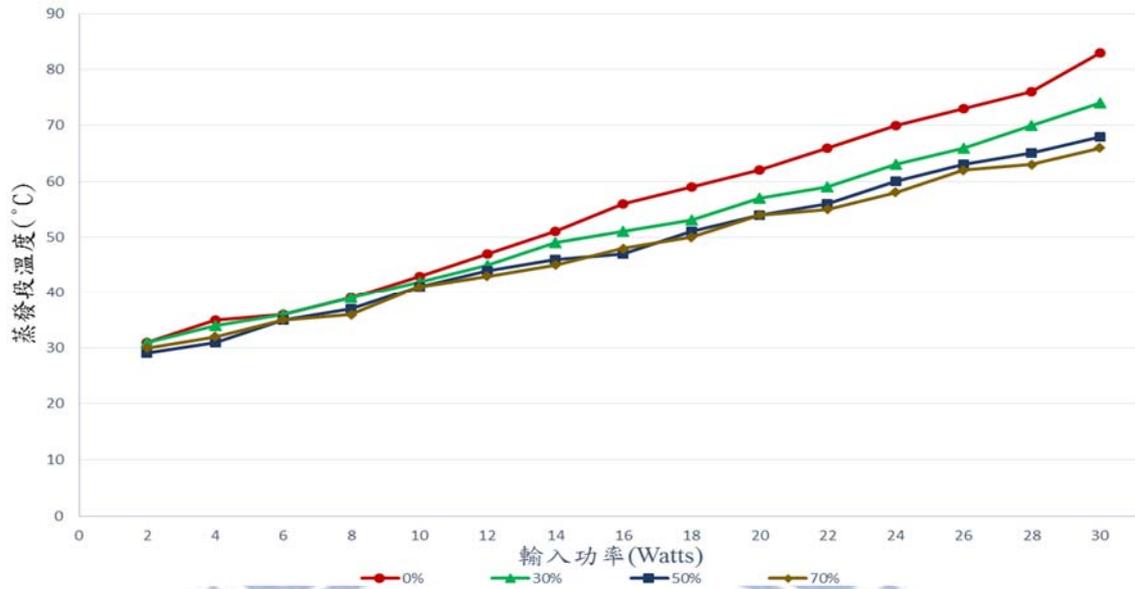


圖 5.12 不同填充率熱管蒸發段溫度對輸入功率關係圖

5.4 LED 燈散熱實驗

一般而言，LED 燈之使用壽命與其結溫(T_j)有關， T_j 溫度愈低則使用壽命愈長，如圖 5.13 所示，因此如何有效降低 T_j 溫度乃為 LED 應用重要之課題。 T_j 溫度可由以下公式估算，公式中各項參數如圖 5.14 若能有效降低熱阻即能降低 T_j 溫度，即能延長 LED 使用壽命。

$$T_j = T_a + (P_d) * R_{j-a} \quad (\text{式 5.1})$$

而 T_j 之溫度不容易量測，因此取而代之大多以量測燈板溫度 (T_s) 來替代，因此本研究中以量測燈板溫度 (T_s) 作為比較參考點。

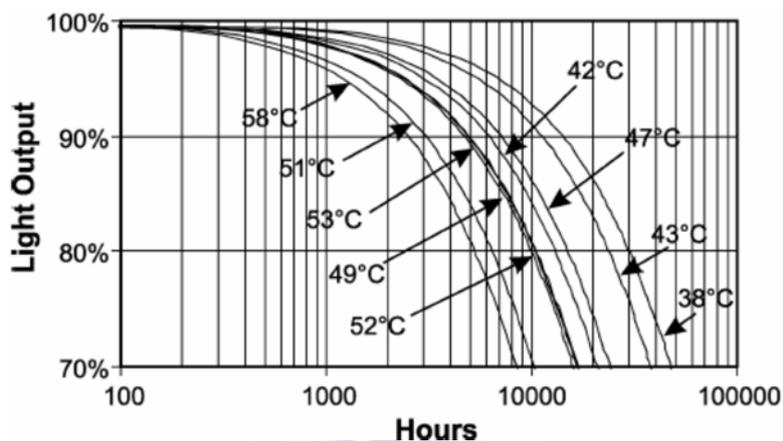


圖 5.13 LED 壽命與溫度關係圖[2]

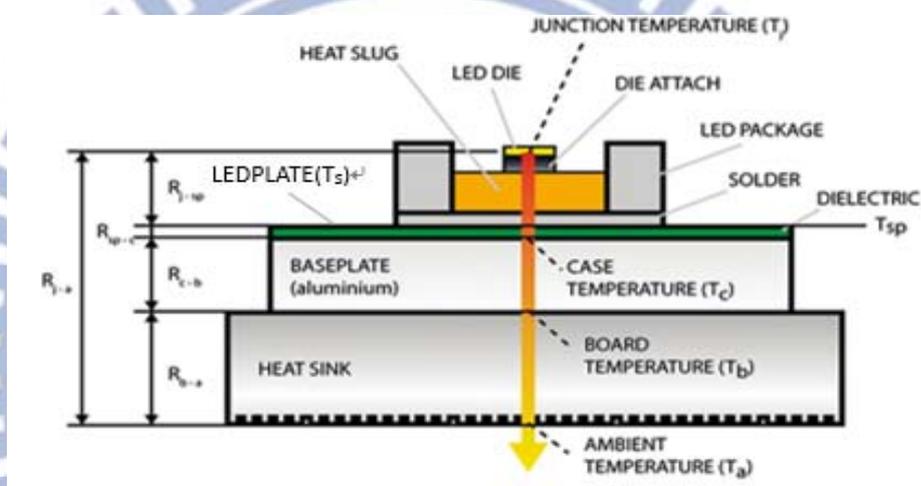


圖 5.14 LED 燈泡中各項參數示意圖[19]

5.4.1 實驗設備

在進行 LED 燈散熱實驗時，取上述測試性能最佳之平板式熱管輻射狀微流道(填充工作流體 70%)來討論。而進行實驗時所需的實驗設備為 LED 燈、冷凝系統及數據擷取系統，其冷凝系統及數據擷取系統皆與熱性能實驗室相同，唯一不同點是將熱性能實驗室作為熱源的加熱片改為 LED 燈緊密貼附於平板式熱管上，整體量測架設示意圖如圖 5.15，實際裝置照片如圖 5.16。

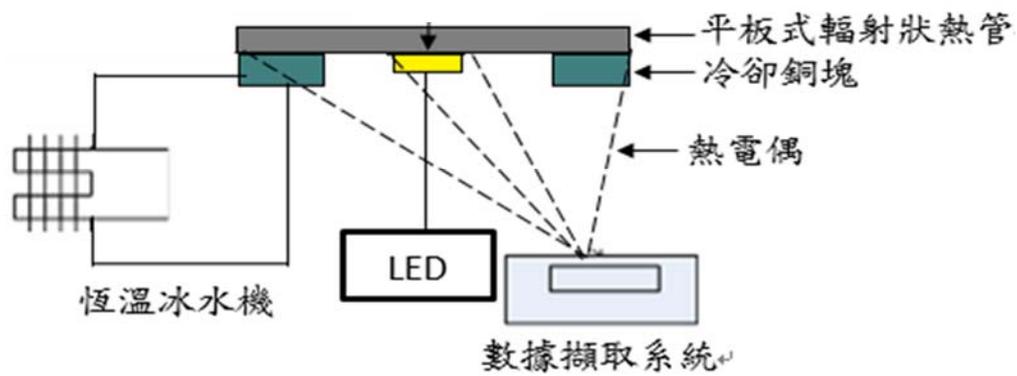


圖 5.15 實驗量測架設示意圖



圖 5.16 實際裝置照片

LED 燈選用昶旭能源股份有限公司 LED 球泡燈，消耗功率為 10W，光源顏色為暖白色，色溫為 3000k，流明值為 750Lm，其直流額定電壓 33V，如圖 5.17。



圖 5.17 LED 燈實際照片

5.4.2 實驗結果

在進行平板式熱管對 LED 燈散熱性能實驗之前，必須先了解原本 LED 燈散熱性能才能進行比較，因此對此 LED 燈之燈板溫度(T_s)進行溫度量測。量測時的室溫為 27°C ，為了確保之後將 LED 燈貼附於平板式熱管上進行實驗時實驗環境條件相同，實驗時在同一地點，室溫維持在 $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。LED 燈泡與 LED 燈板貼附於平板式熱管輻射狀微流道之燈板溫度(T_s)比較如圖 5.18 所示，由圖中可以看出 LED 燈約在使用 20 分鐘後會趨近穩定，而 LED 燈泡穩定溫度約為 60°C ，LED 燈板貼附於平板式熱管輻射狀微流道之穩定溫度約為 46°C 。相對照之下可以發現當 LED 燈板貼附於平板式熱管輻射狀微流道上後，燈板溫度(T_s)明顯的下降，可知平板式熱管輻射狀微流道之散熱性能較原本 LED 燈泡使用之散熱鰭片佳。

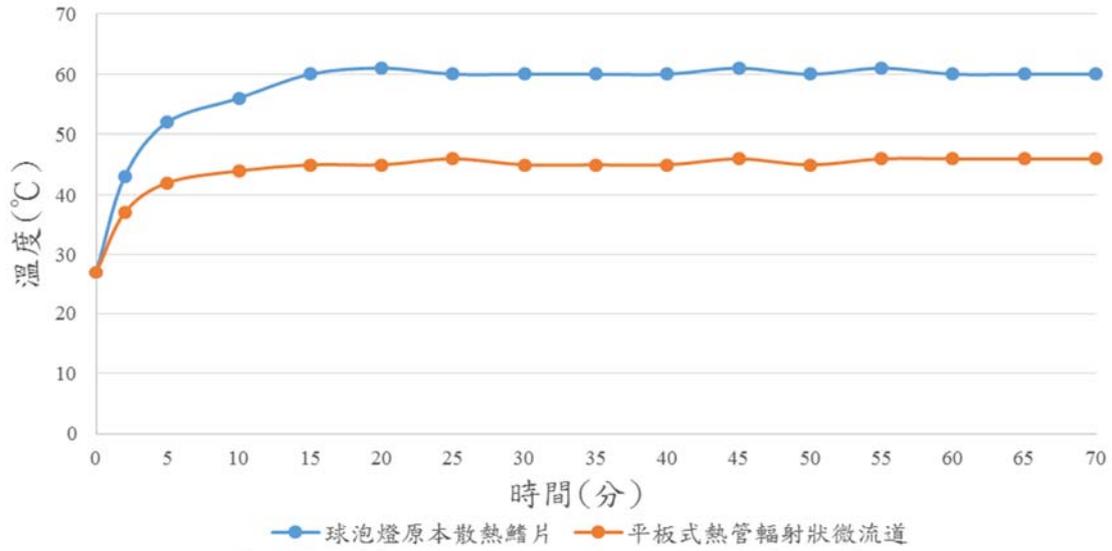


圖 5.18 LED 燈泡與 LED 燈貼附於平板式熱管之燈板(Ts)溫度比較



第六章 結論與未來工作

6.1 結論

本研究利用高液壓成形機台，進行輻射狀微流道之液壓成形實驗，同時並以量測得到之模具幾何與液壓實驗之條件為基礎，建立一板液壓成形之有限元素模型。

液壓成形實驗所得輻射狀微流道之流道深度量測結果，在與有限元素模擬結果比較後，發現雖然液壓成形所得之流道深度與模擬結果所得之流道深度有所出入，但由有限元素之模擬結果可以有效預測輻射狀微流道之成形趨勢。

組裝平板式熱管輻射狀微流道，選用水為工作流體，並以 30%、50%及 70%之填充率，進行工作流體之填充與封裝，架設一套熱性能實驗設備進行測試，實驗測試結果如下：

填充比例為 70%之平板式熱管輻射狀微流道，較其他兩種填充率具有較好之均熱能力，能有效的藉由水的相變化將熱量帶走。由熱性能實驗結果亦可以發現，在填充率由 30%~70%時，熱阻會隨著填充率增加而變小，熱傳效果越好，但填充率為 80%時，熱阻卻變大熱傳效果降低，推測應為填充過多的工作流體會使得熱管無法藉由其相變化來傳熱。最後經由實驗數據計算，本研究中熱性能最佳

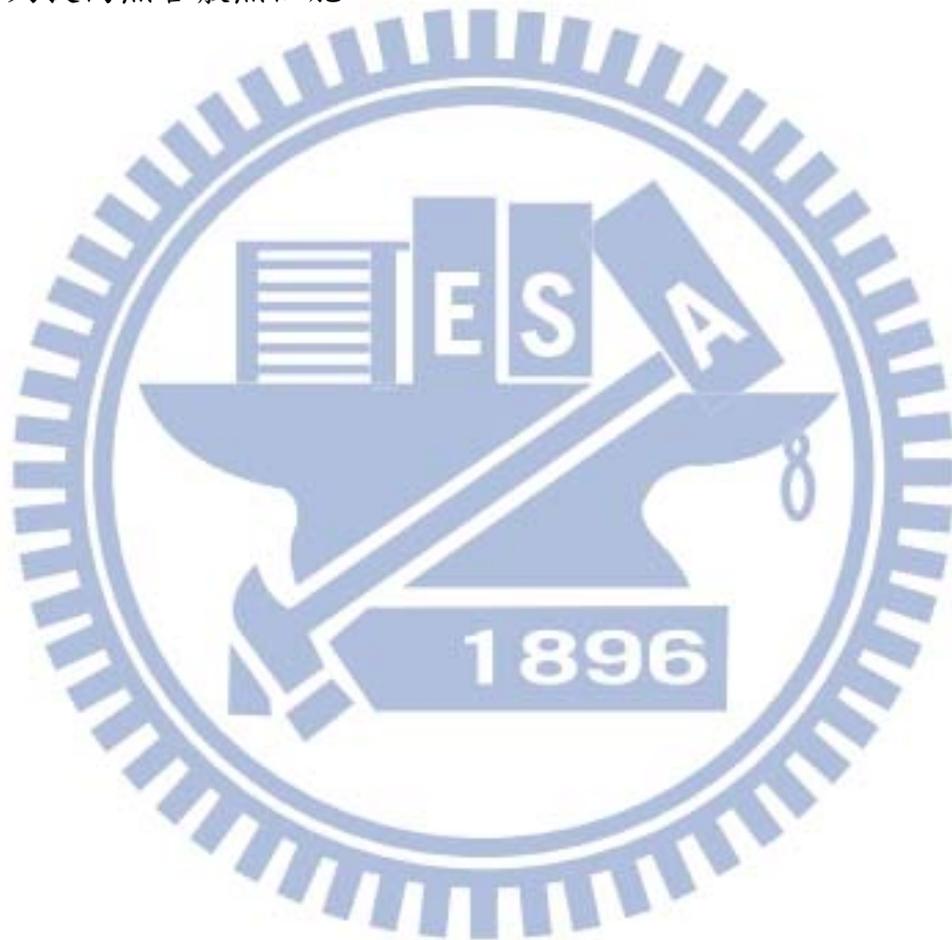
之平板式熱管輻射狀微流道為工作流體填充率 70%時，此時熱阻抗為 0.257KW^{-1} 。接著以此性能最佳之平板式熱管輻射狀微流道實際應用在 LED 燈之散熱上。

將平板式熱管輻射狀微流道實際應用於 LED 燈之散熱上後之燈板溫度(T_s)穩定溫度，在與原本 LED 燈泡之燈板溫度(T_s)比較後，可以發現使用平板式熱管輻射狀微流道後，燈板溫度(T_s)明顯的下降，可知平板式熱管輻射狀微流道之散熱性能較原本 LED 燈泡使用之散熱片佳。

6.2 未來工作

- (1) 本研究中已完成工作流體不同填充率對平板式輻射狀熱管之熱性能影響，後續可繼續討論平板式輻射狀熱管在不同角度的擺放下、輻射狀微流道之流道深度以及將原本的固定流道寬度改為固定流道間距對平板式輻射狀熱管之熱性能的影響。
- (2) 由於本研究中實驗所量測到之流道深度與模擬所得到之流道深度有所出入，因此後續在建立模型時，可考慮使用適應性網格(Adapting Mesh)。同時，在進行材料性質之設定時，也將材料之尺寸效應及成形極限也列入考慮，探討材料性質對於液壓成形之影響。

(3) 本研究中使用純銅做為輻射狀微流道之材料，搭配水為工作流體，而由前人文獻中可得知還有其他材質可使用，可考慮使用鋁搭配液壓成形機台進行熱管毛細結構之成形，發展鋁製平板式熱管，並利用鋁的特性搭配不同的工作流體，探討是否能夠提高熱管散熱性能。



參考文獻

- [1] Jeong Park and Chin C. Lee, "An Electrical Model With Junction Temperature for Light-Emitting Diodes and the Impact on Conversion Efficiency", IEEE Electron Device Letters, vol. 26, no. 5, pp. 308-310, 2005.
- [2] NadarajahNarendran and YiminGu, "Life of LED-Based White Light Sources", IEEE/OSA Journal of Display Technology, vol. 1, no. 1, pp. 167-171, 2005.
- [3] Eugene Hong and NadarajahNarendran, "A Method for Projecting Useful Life of LED Lighting Systems", Third International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE, vol. 5, no. 187, pp. 93-99, 2004.
- [4] R. Hopkins, A. Faghri, D. Khrustalev, " Flat Miniature Heat Pipe with Micro Capillary Grooves", Journal of Heat Transfer, vol. 121, pp. 102-109, 1999.
- [5] 陳柏源，「銅散熱元件之MIM製程及散熱性質研究」，國立台灣大學材料科學與工程研究所，民國94年6月。
- [6] 陳文棟，「平板式微流道熱管散熱效能之研究」，國立中央大學光電科學研究所，民國95年10月。
- [7] Shung-Wen Kang, Sheng-Hong Tsai, Hong-Chih Chen, " Fabrication and test of radial grooved micro heat pipes", Applied Thermal Engineering, vol. 22, pp. 1559-1568, 2002.
- [8] Stéphane Lips, FrédéricLefèvre , Jocelyn Bonjour, " Nucleate boiling in a flat grooved heat pipe", International Journal of Thermal Sciences, vol. 48, pp. 1273–1278, 2009.
- [9] 王榆文，「平板式熱管微流道液壓成形之研究與熱性能測試」，國立交通大學機械工程系所，民國102年7月。

- [10] Ram Viswanth, Vijay Wakharkar, Abhay Watwe, Vassou Lebonheur, "Thermal Performance Challenge from Silicon to System", Intel Technology Journal Q3, 2000.
- [11] U. Vadakkan, M. G. Chrysler, J. Maveety, and M. Tirumala, "A novel carbon nano tube based wick structure for heat pipes/vapor chamber", 23th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Semi-Therm Proceedings, pp. 102-104, 2007.
- [12] 潘文勤，「平板式輻射狀熱管之研製與性能評估」，國立中央大學光電科學研究所，民國97年7月。
- [13] 陳泓志，「輻射狀微流道熱管之研製」，淡江大學機械工程學系，民國90年。
- [14] Z. Marciniak, J.L., Duncan, S.J. Hu., "Mechanics of Sheet Metal Forming", Second edition, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [15] Kruglov AA, Enikeev FU, Lutfullin RYa. "Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope", Materials Science and Engineering, vol. A323, pp. 416–426, 2002.
- [16] 陳彥佑，「金屬薄板液壓膨脹實驗結合成形極限之設備研發與研究」，國立交通大學機械工程學系，民國101年。
- [17] T.J. Kim, D.Y. Yang, S.S. Han, "Numerical modeling of the multi-stage sheet pair hydroforming process", Journal of Materials Processing Technology, vol. 151, pp. 48–53, 2004.
- [18] 蔡宗志，「汽車後行李箱蓋之板金」，國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文，民國91年。
- [19] 「導熱塑膠開發及其在LED球泡燈散熱器之應用探討」，
<http://www.ledinside.com.tw/knowledge/20131030-27981.html>

附錄 A 平板式熱管輻射狀微流道之設計

規格

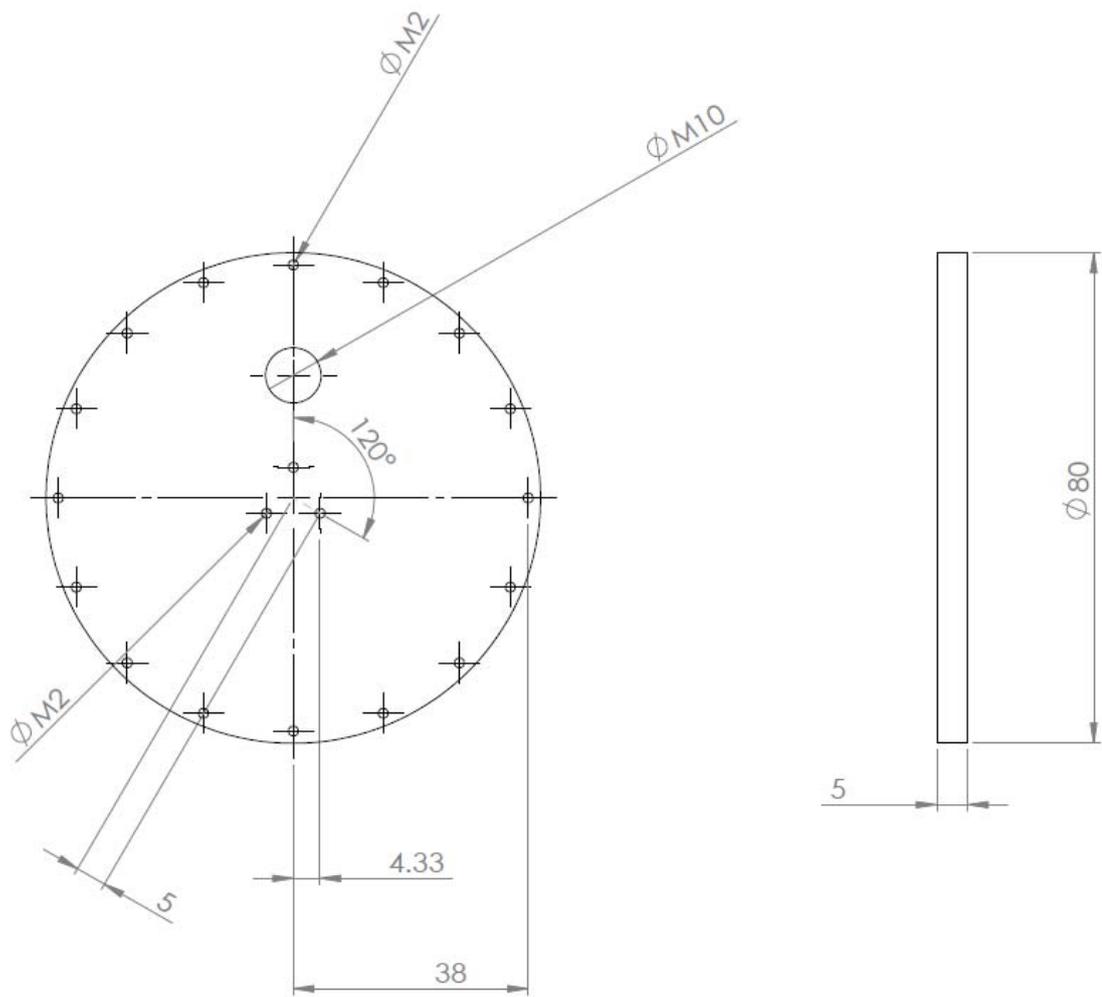


圖 A.1 上蓋版

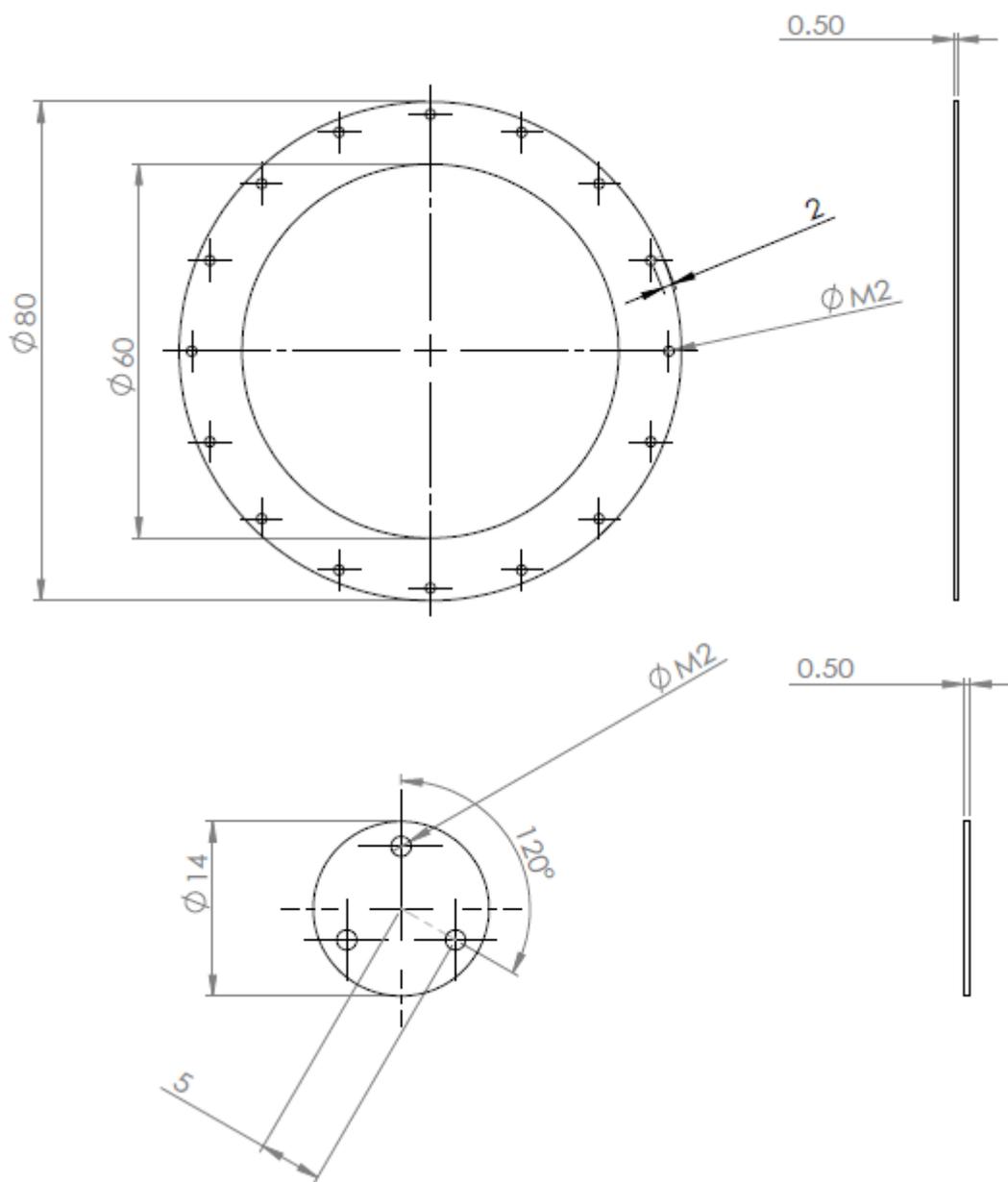
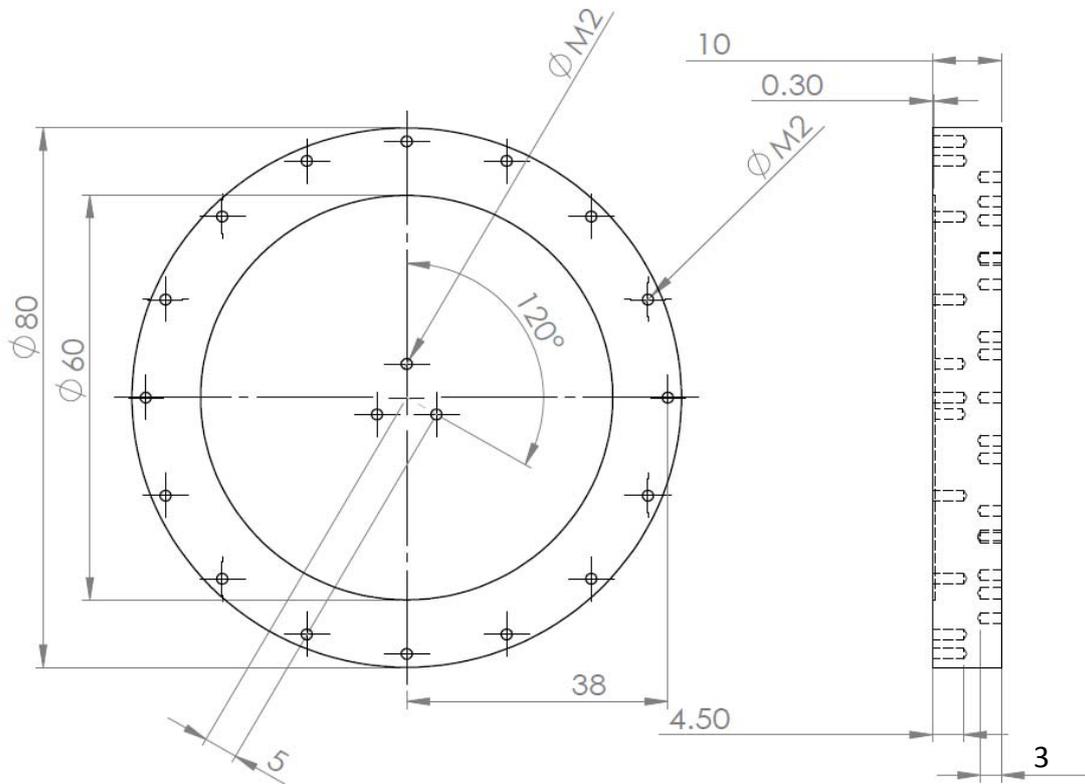


圖 A.2 中間框及中間墊片

正面



反面

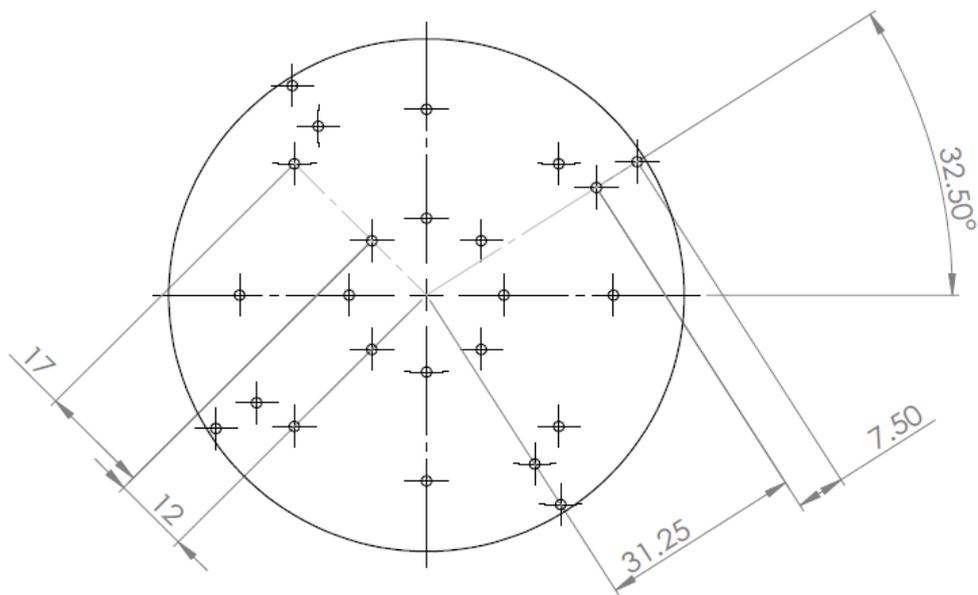


圖 A.3 下底座

附錄 B 矽膠電熱片詳細設計規格

寬(mm)/導線出口側邊	15	長(mm)	15
		厚度(mm)	SHR 1.5mm (0.8 + 0.8)
V	3	W(瓦數)	2
電力密度(W/c m ²)	0.9	Amp(A)	0.675
電熱片溫度應達°C	請依照電力密度對照升溫取線表: 空燒約可達 250+°C;請以溫度控制裝置監控操作或搭配使用		
請特別注意	本單所指定設計的規格超過(標準設計為 0.6 電力密度)電熱片的耐溫 200°C 易燒毀;操作時請務必以溫度控制裝置監控搭配使用		
加工(附件/其他電氣)	(1)導線: 20AWG 300mm 玻纖, 單純出線無接頭或端子。 (2)K-Type:300mm。		
導線 awg(sq)	20	導線長(mm)	300
W 正負 10%阻抗值範圍(Ω)	4.938271605	4.444444444	4.04040404