

國 立 清 華 大 學

碩 士 論 文

溝槽毛細平板熱管之可視化觀察與蒸發熱阻量測

Visualization and Evaporation Resistance

Measurement for Groove-Wick Evaporator of

Operating Flat-Plate Heat Pipes

所 別：動力機械工程研究所

組 別：熱 流 組

學號姓名：9733502 陳 仲 威 Chen, Chung-Wei

指導教授：王 訓 忠 博士 Dr. Wong, Shwin-Chung

中華民國九十九年七月

摘要

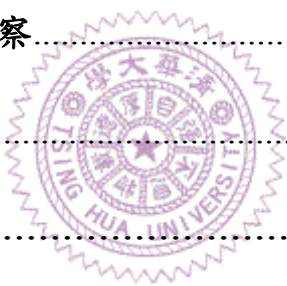
本研究使用可視化之平板熱管，研究具平行溝槽毛細結構之平板熱管蒸發區在操作中發生的現象。溝槽截面為 U 形，寬 0.25mm、深 0.16mm，採用的工作流體分別有水、甲醇、或丙酮。另亦包括於溝槽蒸發區燒結不規則細銅粉的複合式毛細結構。可視化觀察指出，除在低加熱量外，各溝槽中之水膜會分別出現一聚光性端部，各溝槽之水膜的動態行為彼此獨立，隨加熱量增加時，水膜端部逐漸退離加熱區，熱阻會隨此乾化過程而上升。然而，本研究之溝槽毛細之最低蒸發熱阻量測值高於本實驗室先前對多層銅網或燒結銅粉毛細測得之最低蒸發熱阻值，且實驗重複性不及另兩種毛細之平板熱管。當採用複合式毛細結構時，熱管操作性能較溝槽毛細結構時穩定，且具較高之最大加熱量。此外，在三種不同工作流體下均未觀察到核沸騰現象。

目錄

摘要.....	I
圖表目錄.....	IV
第一章 緒論	
1.1 研究背景.....	1
1.2 熱管的結構.....	1
1.3 原理與文獻回顧	
1.3.1 熱管之工作原理.....	2
1.3.2 溝槽毛細蒸發現象.....	11
1.3.3 複合式溝槽毛細.....	15
1.4 研究動機與目的.....	16
第二章 實驗方法	
2.1 實驗架構與配置.....	18
2.2 實驗儀器.....	21
2.3 實驗步驟	
2.3.1 前置作業.....	23
2.3.2 注水量之選擇.....	24
2.3.3 實驗流程.....	25
2.4 實驗數據處理.....	25

第三章 結果與討論

3.1 溝槽毛細之蒸發區觀察.....	28
3.2 溝槽毛細操作中之蒸發熱阻量測與觀察	
3.2.1 選用水為工作流體.....	32
3.2.2 選用甲醇、丙酮為工作流體.....	38
3.3 溝槽燒結粉末毛細之操作中熱阻量測	
3.3.1 選用水為工作流體.....	41
3.3.2 選用甲醇、丙酮為工作流體.....	42
3.4 溝槽毛細之冷凝區觀察.....	43
第四章 結論.....	45
參考文獻.....	47



圖表目錄

表 1 Chen et al.使用之溝槽之形狀與尺寸[8]	9
圖 1.1 熱管結構.....	1
圖 1.2 熱管內水膜與壓降[1]	3
圖 1.3 工作流體之性能參數.....	4
圖 1.4 R. Hopkins et al.之溝槽平板熱管[3]	5
圖 1.5 溝槽中的熱傳途徑與熱阻分析[5]	5
圖 1.6 毛細爬升高度比較 [7]	7
圖 1.7 複合毛細的毛細層[7]	8
圖 1.8 熱阻與水位之對應情形[10]	9
圖 1.9 沸騰遲滯使熱阻降低[11]	10
圖 1.10 熱管中溫度曲線[11].....	10
圖 1.11 加熱瓦數與 U 型、V 型溝槽潤濕長度的關係[13].....	12
圖 1.12 U 型與 V 型溝槽的水位線[13].....	12
圖 1.13 溝槽中水膜發展與水位突降[14].....	13
圖 1.14 溝槽底部的薄膜[15].....	13
圖 1.15 薄膜分區[16].....	14
圖 1.16 過熱度與液膜形狀[16].....	15
圖 1.17 複合式與傳統式熱管性能比較一[18].....	16

圖 1.18 複合式與傳統式熱管性能比較二[18].....	16
圖 2.1 實驗架構.....	18
圖 2.2 溝槽之實際尺寸.....	19
圖 2.3 a 蒸發區燒結粉末之長度.....	20
圖 2.3 b 蒸發區燒結之粉末上視圖.....	20
圖 2.4 鋁合金冷板設計圖.....	21
圖 2.5 加熱台剖面圖.....	22
圖 2.6 注水設備示意圖.....	24
圖 2.7 熱電偶埋入位置.....	26
圖 2.8 熱經由銅板傳導遞至冷凝區.....	26
圖 3.1 乾溝槽.....	28
圖 3.2 濕溝槽.....	29
圖 3.3 蒸發區上方之聚光性端部.....	29
圖 3.4 水、甲醇、丙酮之聚光性端部.....	31
圖 3.5 水之實驗組之蒸發熱阻.....	32
圖 3.6 水之實驗組之熱損失.....	32
圖 3.7 水之實驗組之聚光性端部出現之瓦數與位置對應.....	33
圖 3.8 觀察聚光性端部通過後仍有發現殘留水影.....	34
圖 3.9 a、d、e 實驗中聚光性端部出現之瓦數與位置.....	35

圖 3.10 實驗 a 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應.....	36
圖 3.11 實驗 d 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應.....	36
圖 3.12 實驗 e 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應.....	37
圖 3.13 甲醇、丙酮蒸發熱阻之比較.....	38
圖 3.14 甲醇、丙酮之聚光性端部出現之瓦數與位置對應.....	39
圖 3.15 聚光性端部出現前後甲醇之過熱度與瓦數對應.....	40
圖 3.16 聚光性端部出現前後丙酮之過熱度與瓦數對應.....	40
圖 3.17 不同毛細之蒸發熱阻(水).....	41
圖 3.18 不同毛細與工作流體實驗組之蒸發熱阻.....	42
圖 3.19 水冷凝端滴式凝結之觀察.....	43
圖 3.20 (a)甲醇、(b)丙酮之冷凝區.....	43

第一章 緒論

1.1 研究背景

電子產品走向隨著科技的飛快進步，產品研發方向朝可攜式與多功能化發展，產品的可攜式造成了產品體積不斷縮小。而為了達到產品多功能化，核心晶片就必須要提高運算速度，使其單位面積所產生的熱通量(heat flux)不斷增加。就散熱技術而言，安靜、省電、低成本、高效能及高可靠度一直是工程人員追求的目標。

為保持發熱晶片操作在其容許之溫度之下，散熱元件必須擁有低熱阻，在環境溫度中有效散熱。配合各式電子散熱需求，各式散熱元件皆有廣泛的研究與利用。其中熱管(heat pipe)已被廣泛運用在筆記型電腦及桌上型電腦；其原因為熱管是藉由內部工作流體相變化吸收潛熱而能有效地帶走熱量，且熱管溫度分佈均勻、構造簡單易加工、不需要額外輸入電功運作、技術成熟且成本低廉。

1.2 熱管的結構

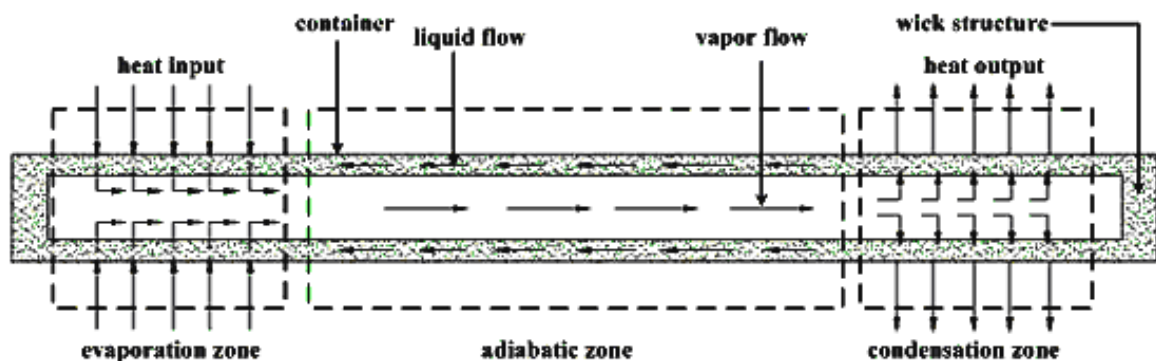


圖 1.1 熱管結構

熱管為一蒸發冷凝系統，由蒸汽流與毛細回水組成循環。其中結構可分為：密閉容器(container)、毛細結構(wick structure)、工作流體(working fluid)，密閉容器主要是隔絕腔體與外界環境，維持內部低壓，並防止外部非凝結氣體進入；毛細結構則是有三個功能，亦即提供路徑使熱能較快速的由熱管內壁傳至工作流體、維持工作流體分佈於蒸發區、及使工作流體順利回流至蒸發區。

1.3 原理與文獻回顧

1.3.1 熱管之工作原理

當熱管蒸發區之工作流體受熱時，會與毛細結構形成半月形液膜，同時在工作流體與毛細結構之間的附著力與工作流體自身之內聚力作用下，形成毛細壓力。

根據 Young Laplace equation，對於毛細之曲率半徑為 r_c 的液膜介面，其液體表面張力 σ ，液體與毛細之接觸角為 θ ，毛細壓 P_c 為

$$P_c = 2\sigma \cos\theta / r_c$$

此壓力將吸吮周圍之工作流體，使其流回蒸發區。而工作流體回流是否順利將受限於毛細結構之流阻。當毛細結構中的流阻大於毛細的吸吮力時，蒸發區之工作流體將無法補充蒸發所需之流量，於是蒸發區毛細乾化。如圖 1.2[1]描述熱管內部水膜與壓降。 ΔP_c 為蒸發區與冷凝區之毛細壓差，其中冷凝端之液膜曲率近似於零，故 ΔP_c 將近似蒸

發區之毛細壓； ΔP_l 為毛細結構水平擺放時，工作流體從冷凝區流回蒸發區之壓差； ΔP_v 為蒸發區蒸氣與冷凝區蒸氣之壓差，此壓差會將高溫蒸氣推向冷凝區； ΔP_g 為重力壓差，當毛細傾斜擺放時，會對工作流體的回流產生助力或阻力。如果忽略蒸氣流衝至冷凝區時的停滯壓損，與相變化壓差，可以寫出熱管在乾化前的壓力平衡式：

$$\Delta P_c \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g$$

當熱管水平操作，乾化時壓力平衡可表示為：

$$\Delta P_{c,max} \doteq \Delta P_l$$

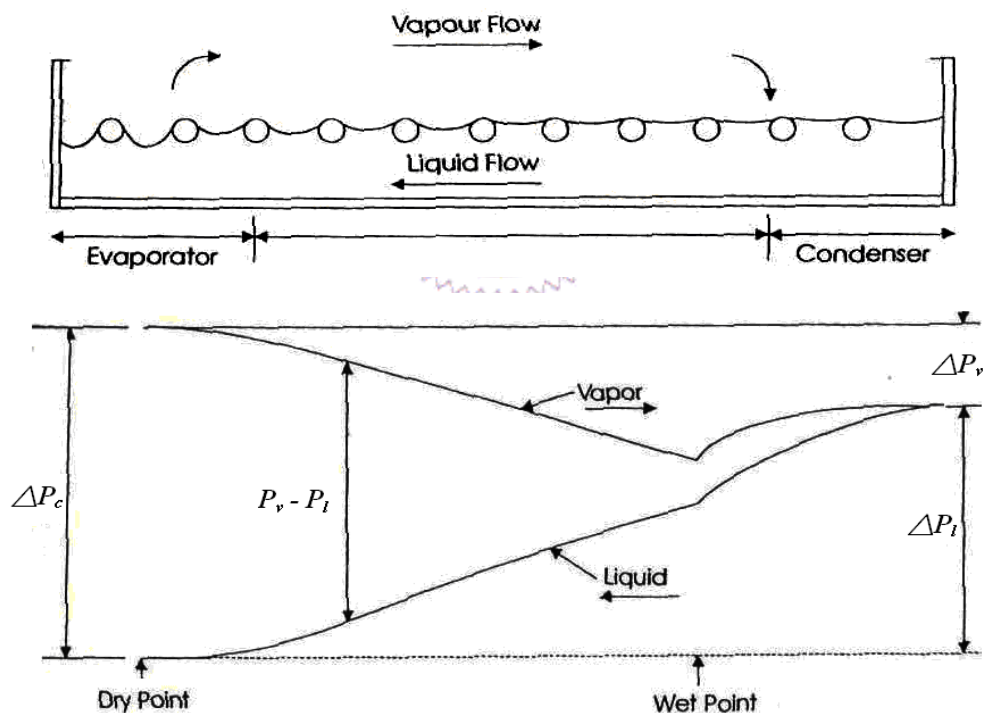


圖 1.2 熱管內水膜與壓降[1]

上式可經 Darcy's law 找到流量與流動壓差之間的關係，將可由工作流體性質與毛細結構參數估計熱管熱傳極限。

根據 Darcy's law，對於液體黏滯係數 μ_l ，液體密度 ρ_l ，以流率

\dot{m} (m³/s) 流經長 L ，截面積 A ，滲透率 K (m²) 的孔隙介質，其壓降為 ΔP_1 。

$$\dot{m} = (K/\mu_l) \times A_w \times (\Delta P_1/L_{eff})$$

代數運算可得熱傳極限的瓦數為

$$Q_{max} = \rho_l \dot{m} \lambda = 2 [\rho_l \lambda \sigma / \mu_l] [K / r_c] [A_w / L_{eff}] \cos \theta \quad (1.1)$$

其中 Q_{max} 為熱傳極限、 λ 為淺熱， A_w/L_{eff} 為熱管之尺寸參數。

Chi[2] 根據工作流體之蒸發潛熱、黏滯力等因素，定義出工作流體之性能參數 (figure of merit) N

$$N = \rho_l \lambda \sigma / \mu_l$$

$\rho_l \lambda$ 呈現工作流體單位體積之熱傳量， σ/μ_l 則有關液體從冷凝區回到蒸發區的回流能力與阻力。因此工作流體之性能參數越大，性能越佳。一般而言，水的 figure of merit 高於其他工作流體，故熱管常用水為工作流體，如圖 1.3。

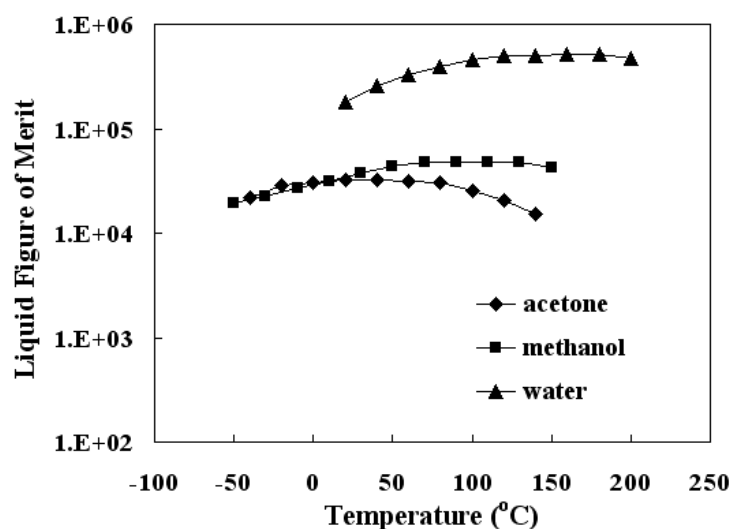


圖 1.3 工作流體之性能參數

(1.1) 式中其他的參數包括：

(1) 滲透率 K (permeability)：高滲透率能夠降低流阻使更多工作流體

迅速回到蒸發區，能夠增加熱管之總熱傳量。

(2) 毛細半徑 r_c (capillary radius)：小的毛細半徑能夠提供較大的毛細

壓力差，能夠增加熱管的總熱傳量。

(3) 接觸角 θ ：接觸角越小，工作流體在毛細結構中的接觸面積越大，

能夠增強其回流所需的毛細力。

Hopkins et al.[3]量測三種尺寸之溝槽平板熱管(如圖1.4)的熱傳極限，其實驗顯示溝槽越深、沿熱管軸向的溝槽寬度越窄熱傳極限越大，且實驗結果與熱傳極限的分析理論一致。

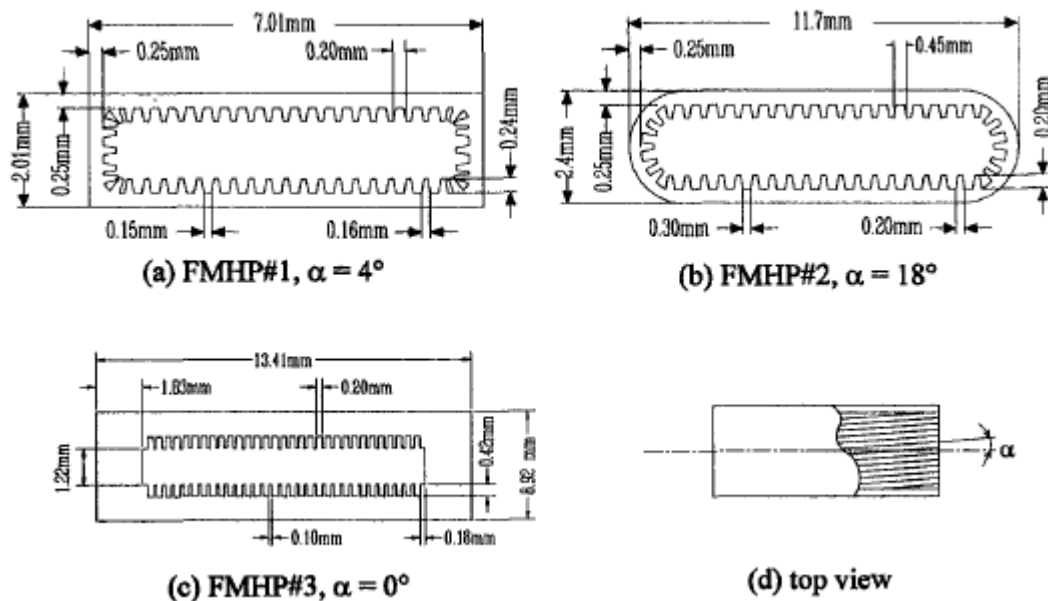


圖 1.4 R. Hopkins et al.之溝槽平板熱管[3]

Do et al.[4]以理論分析長方形溝槽的平板熱管的熱傳極限，其壓力平衡式考慮到液氣界面剪應力、工作流體與溝槽接觸角和填充量的影響。並經由一維熱傳導與 Young-Laplace equation 進行分析，得到

熱傳極限與其底板溫度分布，分析結果與Hopkins et al.實驗[3]相近。

Kim et al.[5] 以理論分析溝槽熱管的熱傳極限與熱阻。其壓力平衡式也考慮到液氣界面剪應力、工作流體與溝槽接觸角和填充量的影響。其熱阻分析如圖1.5，將熱傳途徑由溝槽底板至蒸氣分成兩路，熱經(溝槽底—工作流體對流區—蒸氣)與熱經(溝槽側壁—薄膜蒸發區—蒸氣)。經由路徑(溝槽側壁—薄膜蒸發區—蒸氣)的熱阻較小，但受限於薄膜蒸發熱傳只在薄膜區進行，故此熱阻受溝槽中液膜高度 $h_m(x)$ 影響。其研究顯示工作流體在溝槽的深寬比($h_m(x)/t_{base}$)是影響溝槽熱管性能的重要參數。此比例除了影響熱管的毛細力與流阻外，當溝槽總寬不變時，亦會調整溝槽側壁的寬窄 t_{solid} 。當溝槽的側壁較寬時，側壁的熱阻變小，導致總熱阻較低。Kim et al.估計當溝槽具較深且較窄的流道時，熱傳極限可提高48%~78%，總熱阻會減少7%~11%。

evaporation section

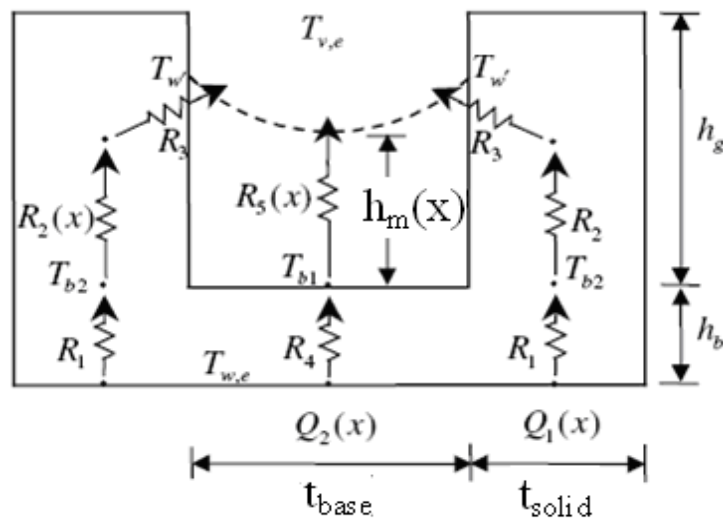


圖 1.5 溝槽中的熱傳途徑與熱阻分析[5]

Anand et al.[6]將矽晶片經化學加工成V型溝槽，置入戊烷後密封，傾斜一個角度於底板較高處加熱，由視玻璃觀察乾化點位置，並量測底板溫度與乾操作（未置入戊烷）時做比較。發現當溝槽乾化後，底板的溫度會上升，且該位置的底板溫度與乾操作時的底板溫度相同。其實驗結果與熱傳極限理論分析相符，當傾斜角度越大、加熱瓦數越大，乾化位置離加熱點越遠。

Tang et al.[7]量測各式毛細結構的毛細力，其實驗將毛細鉛直浸泡於酒精中，量測一分鐘後乙醇爬升高度，爬升高度越高表示毛細力較強。測試結果如圖 1.6，顯示毛細力依序如下：溝槽中燒結粉毛細優於燒結粉末毛細，再優於溝槽毛細。因溝槽燒結粉毛細擁有較多之抓水毛細層，如圖 1.7 中之溝槽/粉末接觸層、孔隙層、溝槽底層。

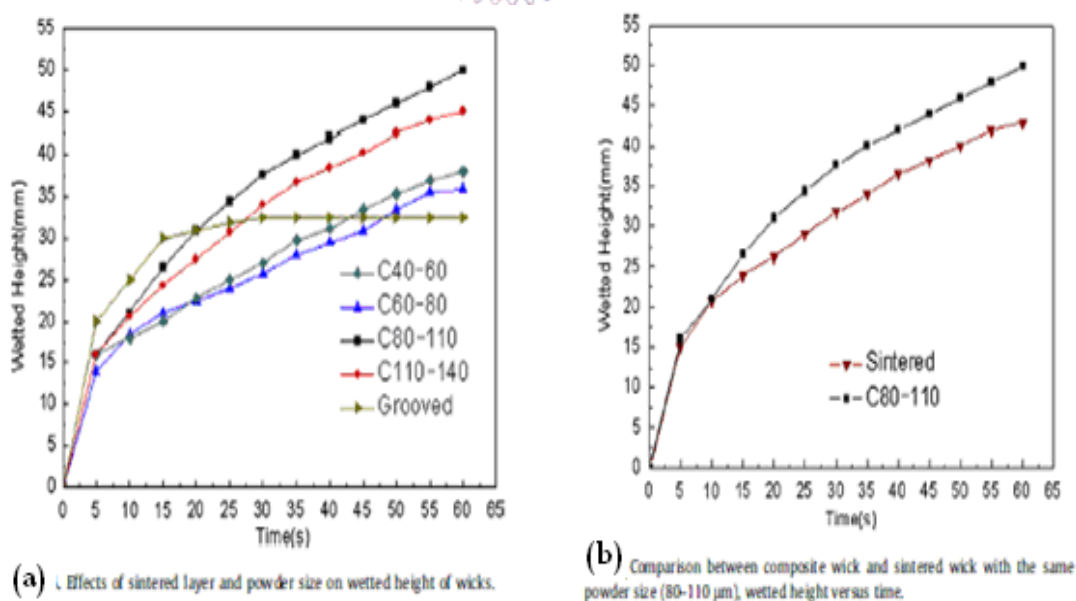


圖 1.6 毛細爬升高度比較 [7]

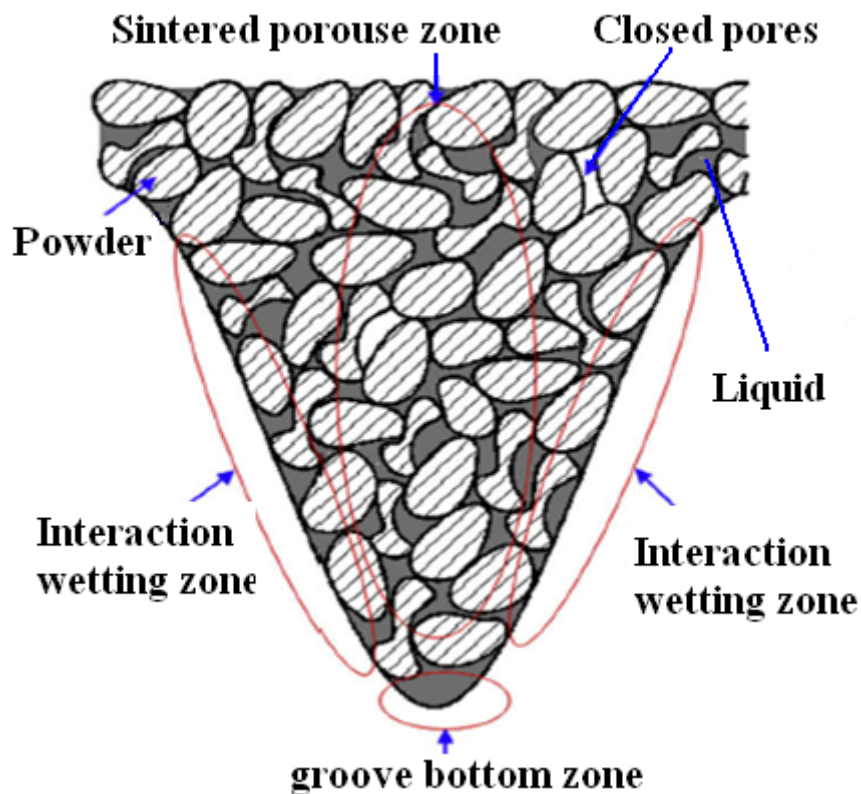
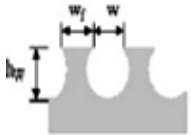
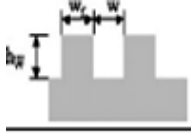


圖 1.7 複合毛細的毛細層[7]

Chen et al.[8]分別選用蝕刻加工與銑削加工之溝槽毛細，比較是否因加工方式不同，而造成毛細極限、毛細之沸騰極限與熱阻之差異。其溝槽之形狀與尺寸整理於表 1 中。該實驗將測試溝槽與水平呈 5° 傾斜，使溝槽平板的低處浸泡於水中，於溝槽底板另一端加熱，以測試其毛細極限，並在加熱區上方觀測。結果顯示兩種溝槽之沸騰極限與熱阻，並無較大差異。但溝槽底的幾何形狀確實影響加熱操作時的毛細極限，因蝕刻之溝槽底接近圓形，毛細力較弱。並發現加熱瓦數增大時，溝槽中會產生局部沸騰，使熱阻並降低，且該沸騰之氣泡不會阻礙溝槽中的回水。繼續加大其工作瓦數，則發生乾化。

Geometric details of test samples

Scheme of wick (side view)	Fabrication process	Sample name	Sizes of micro-structures $w/w_f/h_w$ (μm)	Sample sizes $L/W/T$ (mm)
	Chemical etching	E_500	550/461/512	150/30/2
		E_300	282/299/286	150/30/2
		E_200	201/197/188	150/30/2
	End milling	M_500	581/440/500	150/30/2
		M_300	316/381/363	150/30/2
		M_200	222/179/226	150/30/2

The sample sizes are 150 mm in length, L ; 30 mm in width, W ; 2 mm in thickness, T and the feature sizes (FS) of micro-grooves are approximately ranged from 200 to 500 μm and shown with w , w_f and h_w .

表 1 Chen et al.使用之溝槽之形狀與尺寸[8]

本實驗室[9,10]陸續研究操作中熱管之性能與可視化毛細中的現象，當輸入瓦數加大時，毛細中水膜下降，伴隨熱阻變小。當量測到最低熱阻時，水膜退至平板熱管底部，接著觀察到局部乾化之現象，伴隨著熱阻上升，如圖 1.8。

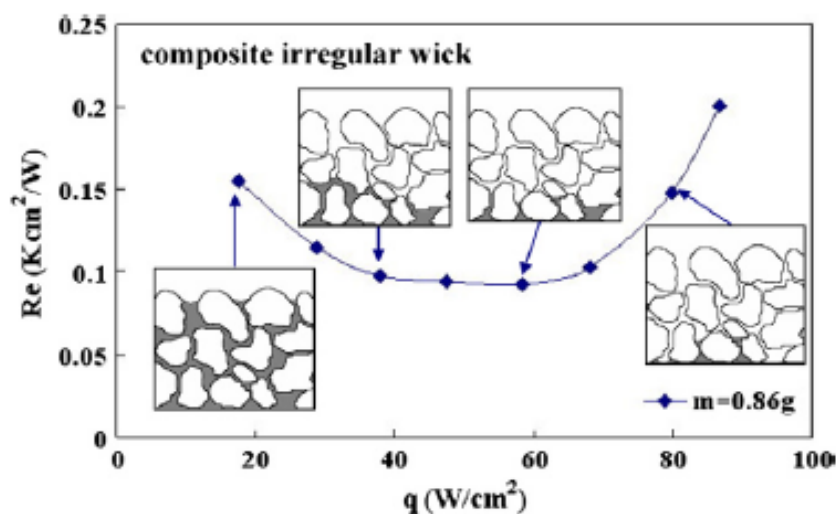


圖 1.8 熱阻與水位之對應情形[10]

另一方面Lips et al. [11]以可視化觀察銅質溝槽式平板熱管的操作過程，其工作流體為甲醇，溝槽寬度及深度均為0.4mm，真空度

10^{-6} mbar。加熱此平板熱管，發現蒸發區溝槽中有沸騰的出現，如在高熱通量時降低沸騰的瓦數，原先產生沸騰的成核址處，尚殘留蒸汽，使得在低瓦數下沸騰仍能維持，這時量測之熱阻值較無沸騰時之低。此為沸騰的遲滯現象，如圖1.9所示。在 9.6 W/cm^2 時，遲滯現象所出現之核沸騰，僅造成蒸發區溫度降低，對絕熱區與冷凝區之溫度並無影響，如圖1.10所示。

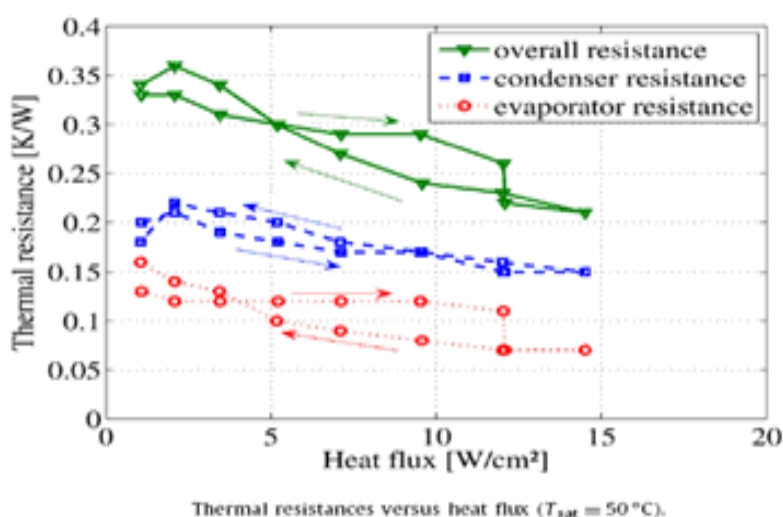


圖1.9 沸騰遲滯使熱阻降低[11]

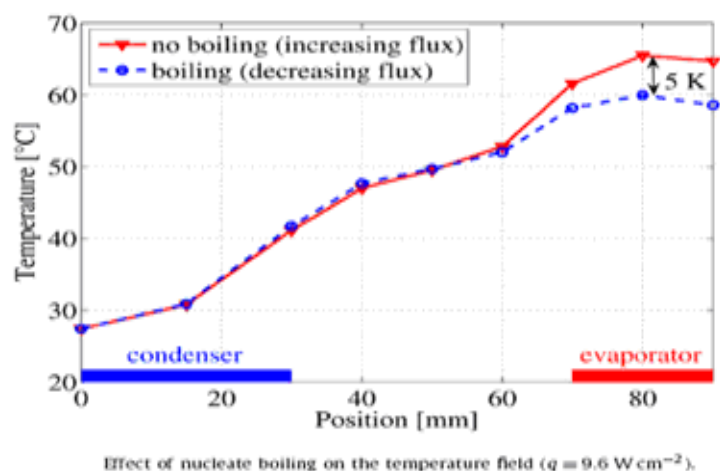


圖1.10 熱管中溫度曲線[11]

1.3.2 溝槽毛細蒸發現象

現在以溝槽毛細為基礎討論毛細中的蒸發現象。當熱管的一端置於熱源處，熱由高溫處首先穿過金屬壁進入溝槽毛細中，溝槽毛細內的工作流體受熱開始蒸發。

Holm and Goplen[12]以薄膜蒸發(thin film evaporation)理論研究溝槽水膜加熱情形。表面張力使水與溝槽壁形成半月形水膜，當此延伸的半月形水膜受熱，可以依熱傳特徵分成三區：平衡薄膜區(Equilibrium Thin Film Region)、蒸發薄膜區(Evaporating Thin Film Region)與本體半月膜區(Intrinsic Meniscus Region)。平衡薄膜區分子吸引力極大而不蒸發，因此為絕熱區；蒸發薄膜區擁有極大熱傳效果；本體半月膜區的水膜較厚，熱阻大。

Stroes and Catton [13]測試 V 型與 U 型溝槽傾斜受熱之毛細力。除截面形狀外，兩溝槽之長度尺寸皆為寬 3.36 mm 深 2 mm。如圖 1.11 顯示，不論是否加熱，V 型溝槽潤濕之長度均較 U 型溝槽長。Stroes and Catton 指出 V 型溝槽之毛細力雖優於 U 型溝槽，但 U 型溝槽卻可由較短之薄膜區域，散同樣的熱，顯示 U 型溝槽之薄膜區能承受較大之熱通量。此外當 U 型水位落入等截面區時，毛細力與將受限於幾何形狀而未改變，Stroes and Catton 稱此區域為截止層(dead zone)，如 1.12 圖。

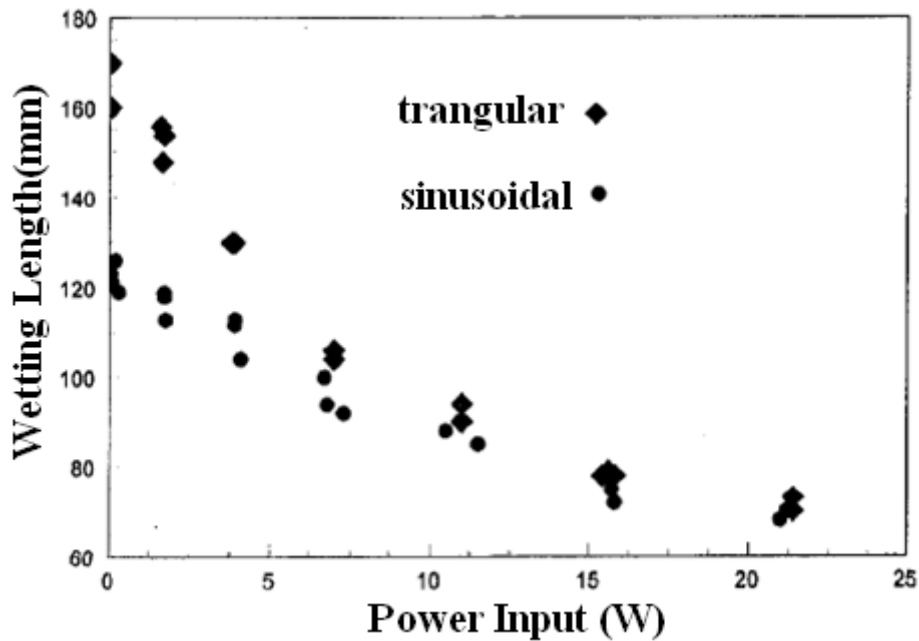


圖 1.11 加熱瓦數與 U 型、V 型溝槽潤濕長度的關係[13]

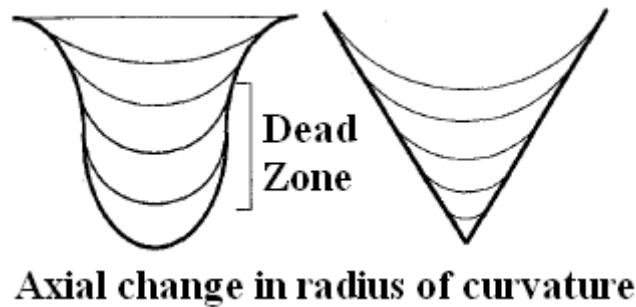


圖 1.12 U 型與 V 型溝槽的水位線[13]

Nilson et al.[14]針對長方形溝槽的理論研究中指出，工作流體在溝槽中受熱蒸發時，蒸發區之溝槽水位會有急劇變薄的現象。原因為溝槽壁上方之兩角落容易抓水，因此擁有很強之毛細力。當溝槽中工作流體受熱蒸發時，因角落抓水的效果，使水位駐留在高水位，但液膜會沿軸向位置逐漸彎曲(meniscus deformation)。當此毛細壓不足以供應蒸發之流量時，水位將因重力效應突降至溝槽底。之後工作流體將在溝槽底的角線上，發展成溝角流(corner flow)，如圖 1.13。

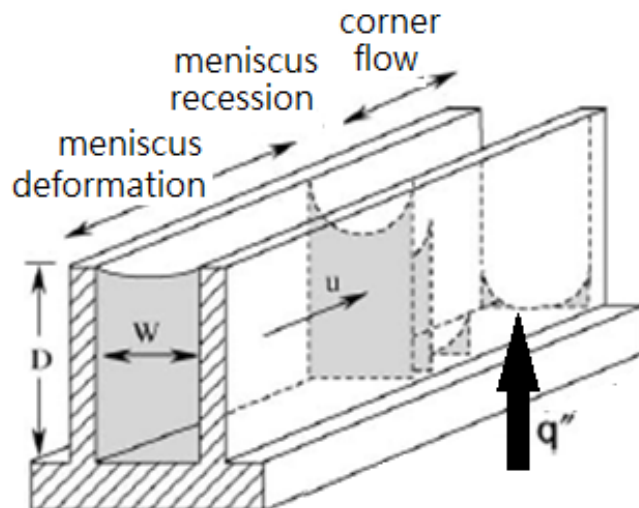


圖 1.13 溝槽中水膜發展與水位突降[14]

Jiao et al.[15]以理論研究溝槽受熱時，半月型水膜的薄膜蒸發熱傳，文中指出當溝槽中水退至底部時水膜會拉長，底部因薄膜蒸發產生高效率的熱傳，如圖 1.14 中 B-B 區域。

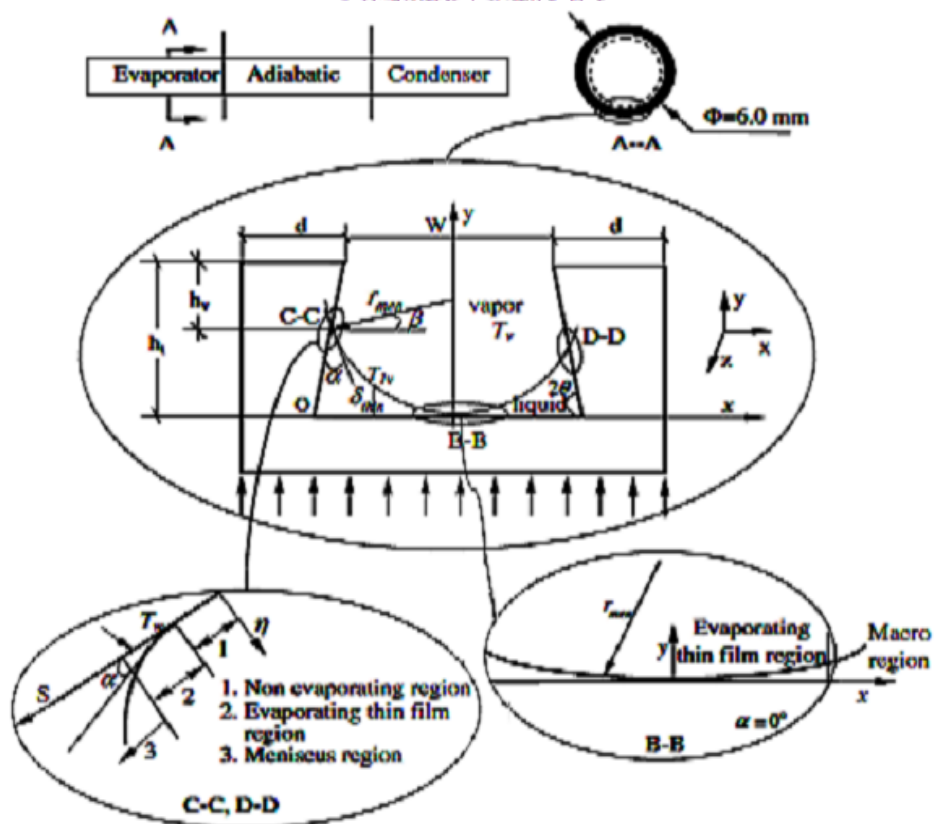


圖 1.14 溝槽底部的薄膜[15]

Wang et al.[16]以理論研究毛細管之薄膜蒸發，其理論模型先把水膜分為巨觀區與微觀區，在依主控力把水膜分為三區，不蒸發區、薄膜區與本體半月膜區如圖 1.15。不蒸發區，分子力緊緊吸附水分子抑制蒸發；本體半月膜區，毛細力使水膜彎曲變厚，因此熱阻大，不利傳熱。所以在分子力與毛細力的過度區域，為主要傳熱區。在圖 1.15 中假設蒸氣壓 P_v 為定值； $x < 0$ 區域因分離壓力 P_d (disjoint pressure)，而無蒸發現象，故該區域之液態壓力 $P_l(x)$ 為定值。 $x > 0$ 區域隨液膜變厚，分離壓力 P_d 漸減，毛細力 P_c 影響力增大，陸續有蒸發發生。工作流體蒸發時，毛細力將吸吮周圍之工作流體，使此處之液壓 $P_l(x)$ 較上游低，上流工作流體循此壓差補充蒸發流。故薄膜區之壓力平衡如下：

$$P_v - P_l(x) = P_c + P_d$$

$$P_v = P_l(x) + P_c + P_d$$

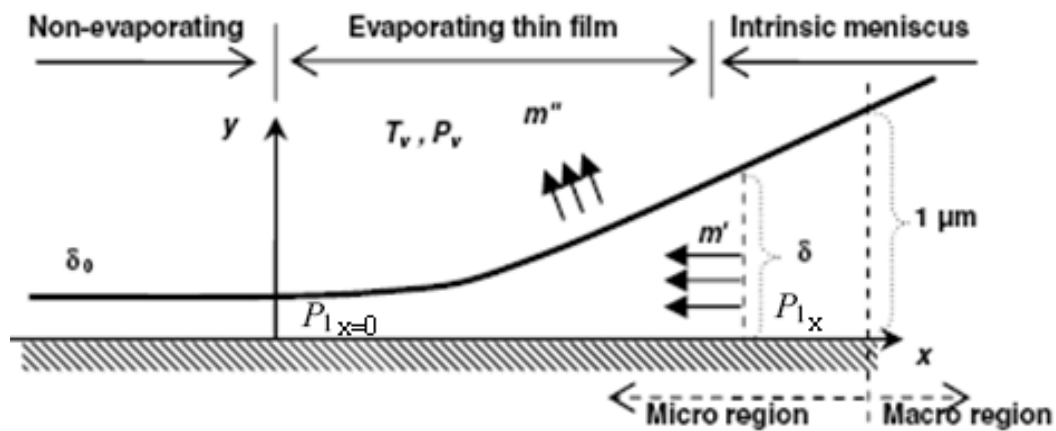
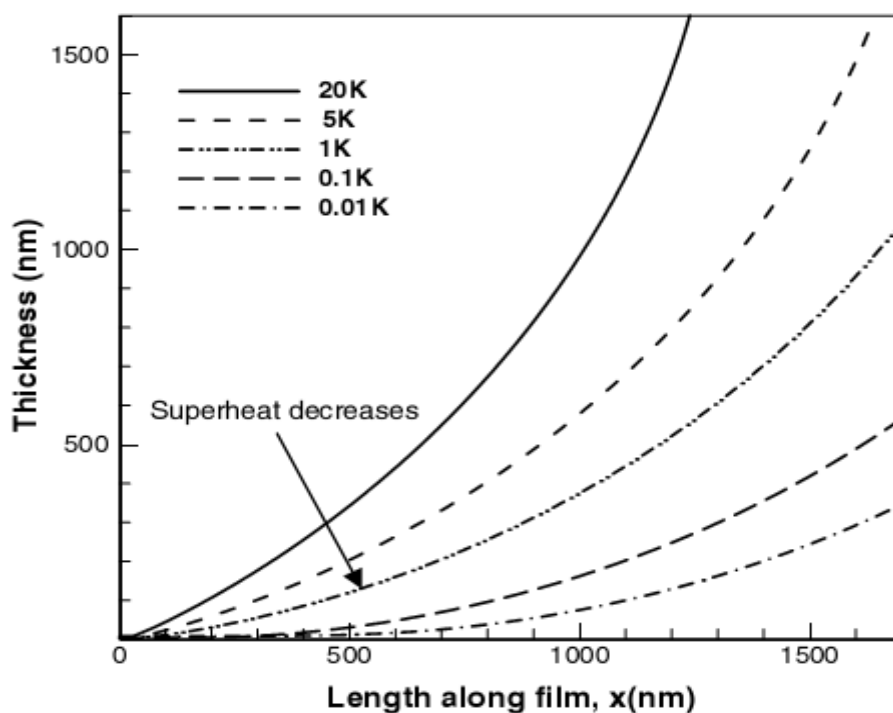


圖 1.15 薄膜分區[16]

而蒸發多寡與過熱度有關，當蒸發量逐漸變大時，將會調節薄膜的幾何形狀，使薄膜區變短液膜迅速增厚，曲率迅速變大，如圖 1.16，此效果使梯度 $\delta P_d/\delta x$ 變大；也使梯度 $\delta P_c/\delta x$ 變大，反應在 $P_1(x_1) - P_1(x_2)$ 上，促成更多流體循此壓差到達此區域。



Effect of superheat on the film thickness profile ($R^* = 2500$ nm).

圖 1.16 過熱度與液膜形狀[16]

Dhavaleswarapu et al.[17]以高潤濕性庚烷，置於一建構 $500\mu\text{m}$ 流道的晶片上，在流道出口處加熱，以紅外線攝影並記錄此薄膜形狀與溫度，實驗發現 70%熱經由長度小於 $50\mu\text{m}$ 的薄膜區傳遞。

1.3.3 複合式溝槽毛細

劉睿凱等人[18]針對單一熱管 $\Phi 6 \times L190 \times t3$ mm 在成形後性能衰

退現象，開發出複合式毛細結構熱管因應。結果顯示使用兩種不同燒結長度的溝槽燒結粉毛細(GSP)皆比純溝槽或純粉末毛細的性能穩定，如圖 1.17，其中(GSP L40)為於溝槽蒸發區中燒結粉末 40mm 長。但網目燒結粉毛細(MSP)與純網目毛細的性能卻無太大差異，如圖 1.18。

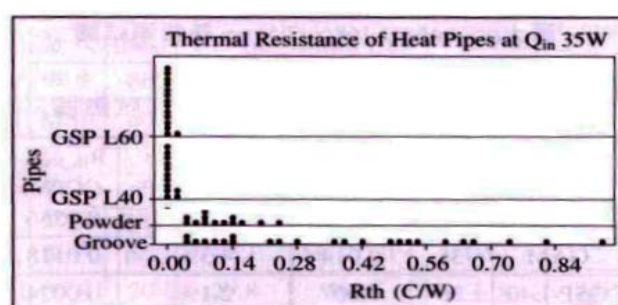


圖 1.17 複合式與傳統式熱管性能比較一[18]

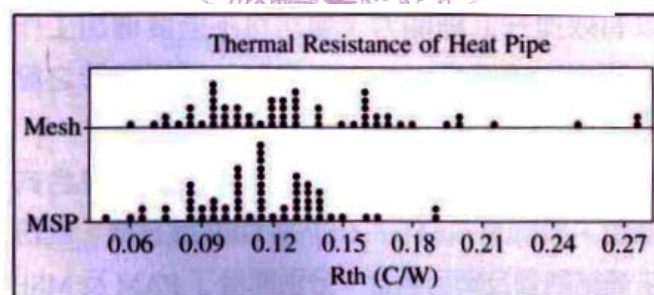


圖 1.18 複合式與傳統式熱管性能比較二[18]

1.4 研究動機與目的

熱管為一封閉腔體，過去的學者大部分以測試性能為主，並根據在大氣下的實驗觀察來間接推測內部的物理行為，較少有研究直接觀察熱管內部真正的熱傳機制與現象。

本實驗室在熱管可視化方面，發現水在燒結多層銅網與銅粉毛細蒸發器中並無沸騰現象外[4,5]，並測量出上述毛細在不同熱通量下之蒸發熱阻。

本研究將進一步了解溝槽毛細的物理現象，以及當溝槽燒結不規則粉末時，其性能是否比溝槽毛細佳。



第二章 實驗方法

2.1 實驗架構與配置

本研究實驗設計主要有以下重點，分別為：建立一平台以實驗模擬真實平板熱管工作情形；可視化觀察蒸發區毛細結構工作流體行為；量測熱管底板與內部蒸汽溫度以估計其蒸發熱阻。

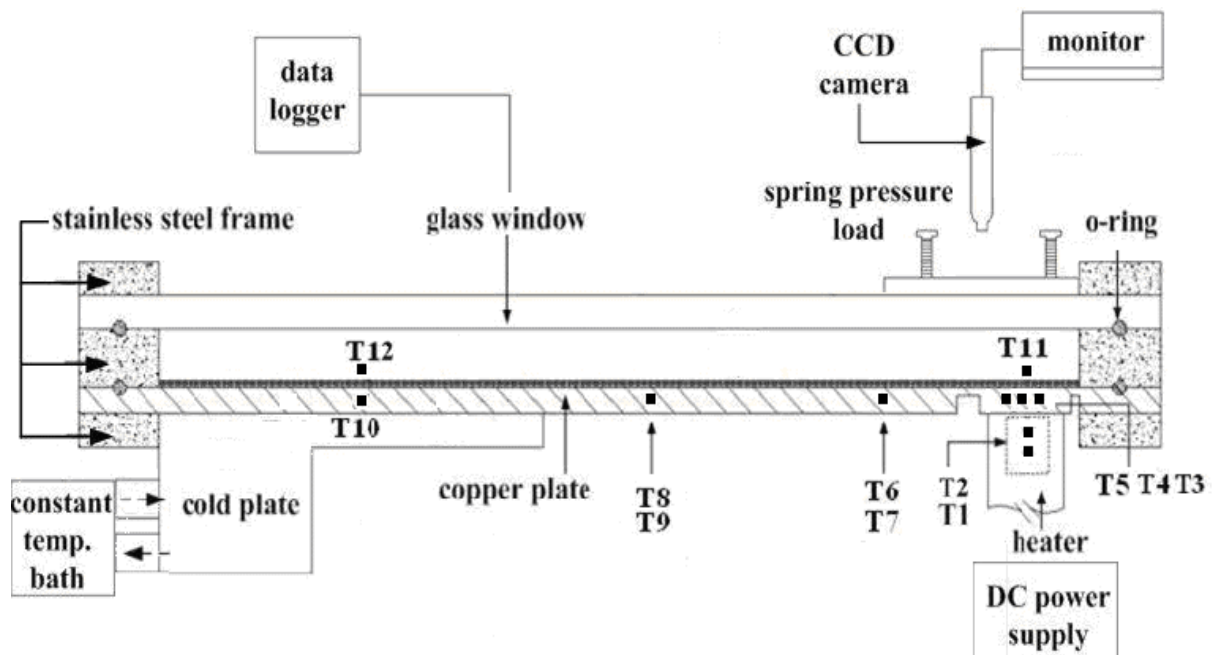


圖 2.1 實驗架構

建立一平台以實驗模擬真實平板熱管工作情形；由於熱管之組成為密閉容器、毛細與工作流體。

本實驗平板熱管採取組裝式設計，分別設計三層不鏽鋼框固定無氧銅板及玻璃，其優點為可以方便替換中間銅板改變毛細結構，並且可以重複組裝。上方玻璃搭配中間銑空之不鏽鋼框則可以提供攝影機拍攝或肉眼觀察。為了達到真實熱管工作條件，本研究在不鏽鋼框與

銅板之間以及玻璃與不鏽鋼框之間使用 o-ring 密封，其優點為簡化密封系統手續；缺點為真空度無法降至太低且無法維持太久，本實驗設計真空度可達到 10^{-2} Torr，抽真空 15 分鐘回壓在 7×10^{-2} Torr 以內。

本實驗之平板熱管內部腔體尺寸為 117(長) \times 26(寬) \times 8(高) mm^3 ，蒸發段長度為 11mm，冷凝段為 50mm，其餘空間為絕熱段。

本實驗採用 4mm 厚之無氧銅板(C1010，銅含量 99.99%以上)，為了減少過多的熱藉由銅板傳遞至冷凝區，在銅板絕熱區兩端與熱源接觸面周圍銑深 3mm 之溝槽，並在銅板絕熱段底部安排 4 個溫度量測點(T6~T9)，計算銅板側向傳遞之熱量如圖 2.1。

溝槽毛細加工於銅板之上，經化學蝕刻後的尺寸為深 \times 寬 $=0.25 \times 0.16 \text{mm}^2$ 如 2.2 圖，橫截面共 64 溝，全長 116mm。

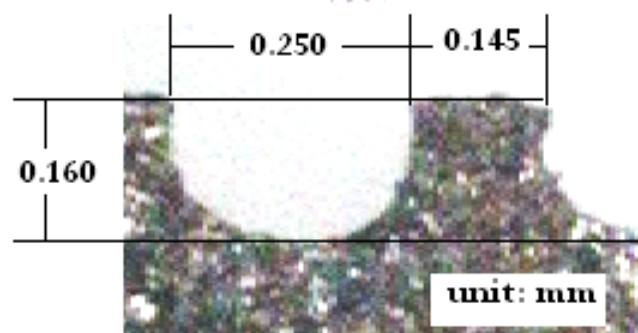


圖 2.2 溝槽之實際尺寸

為符合本研究需求及目的，將會在溝槽蒸發區中燒結長度約 24mm 之細不規則粉末(粒徑在 $0.78 \mu\text{m}$ 以下)如圖 2.3 a, b，比較未燒結粉末之性能差異。

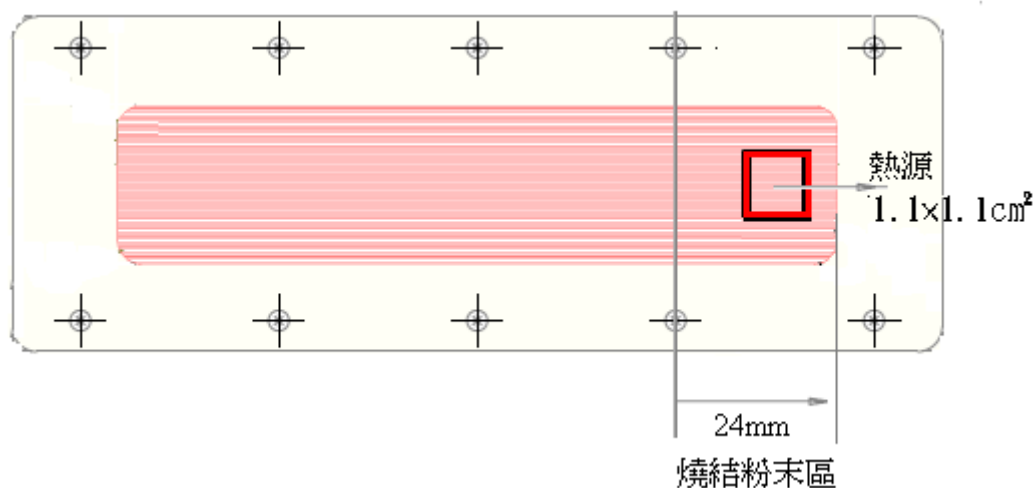


圖 2.3 a 蒸發區燒結粉末之長度



圖 2.3 b 蒸發區燒結之粉末上視圖

因燒結毛細結構在空氣中會氧化形成氧化亞銅，造成親水性隨時間而逐漸下降，本實驗中燒結毛細銅板暴露在空氣中不超過 30~60 分鐘。

本研究工作流體為去離子水(de-ionized water)、丙酮、甲醇，使用前接經煮沸排出溶解之不可凝氣體。為了量測熱管內部真實溫度，從不鏽鋼框側面銑穿兩個小孔伸入兩支 K 型熱電偶(T11~T12) 圖 2.1，量測蒸發區上方蒸汽溫度並藉由此溫度計算蒸發熱阻；另一支則是量測冷凝區之蒸汽溫度做為比較；其中 T11 位於 T4 正上方約 1mm 處；T12 位於距離 T10 前 2mm 處之上方 1mm。

本研究所使用的冷凝方式為間接式冷板冷卻(indirect cold plate water cooling)。一般平板熱管的冷卻方式是將冷凝區置入水套(water jacket)中以水直接冷卻，或是利用冷板將冷凝區完全包住。但本研究為了方便可視化，將冷板置於冷凝區的下端，如圖 2.4 所示；為了彌補冷凝能力之不足，將熱管冷凝區比例增加，面積為 50(長) \times 30(寬) mm²。

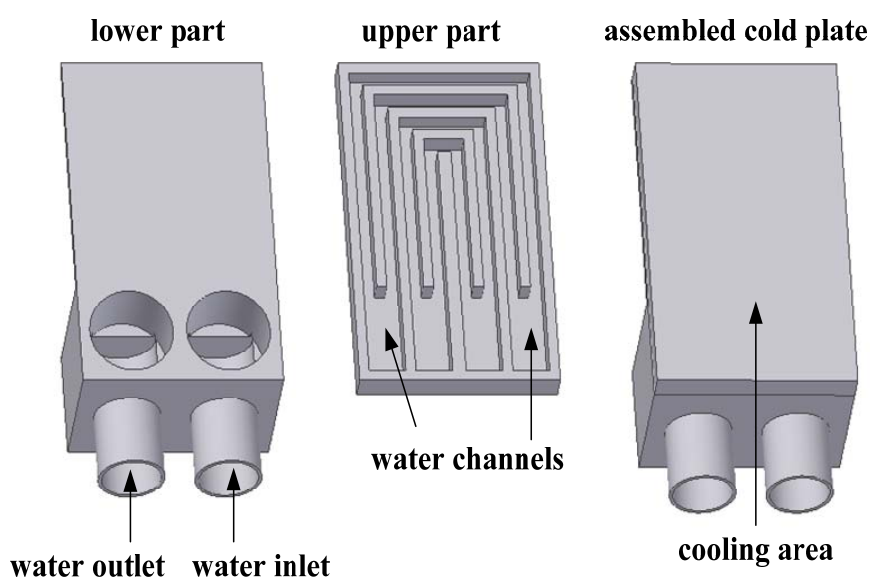


圖 2.4 鋁合金冷板設計圖

冷板材質為鋁合金(T6061)，為了增強冷卻效應，在冷板內部銑了流道並在流道壁面製造出凹凸不平的小凹洞以增加熱傳面積，設計如圖 2.3 所示。並將冷板接至低溫水槽，冷卻水溫與質量流率分別為 20℃ 及 24 g/s。

2.2 實驗儀器

為搭配熱管時操作實驗需使用以下之設備：

- (1) 加熱台(heater)：如圖 2.6 所示。加熱面積為 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ，外圍使用陶瓷材料和電木做為絕熱。距離加熱面 0.5 cm 埋入兩根熱電偶 T1, T2，彼此之間距離為 1 cm 。

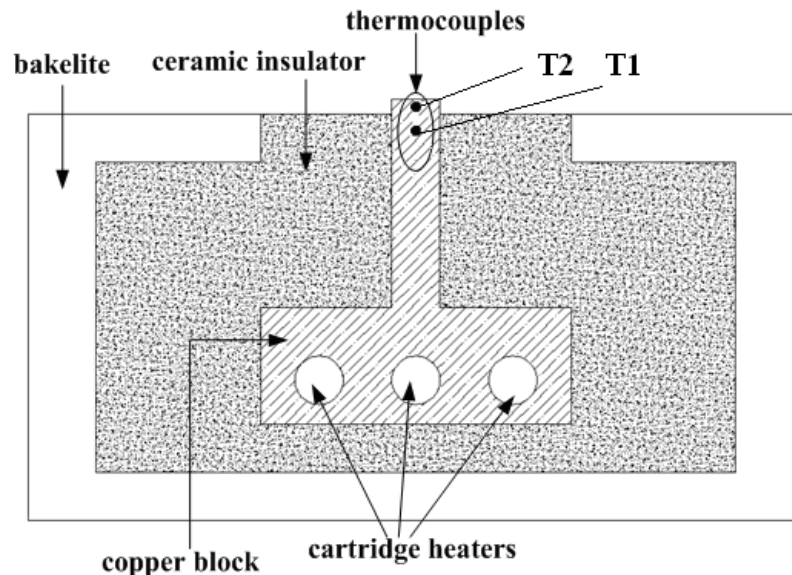


圖 2.5 加熱台剖面圖

- (2) 恆溫水槽(constant temperature water tank)：流量為 24 g/s ，冷卻水溫度控制於 20°C 。
- (3) 電源供應器(power supply)：Topward 6603D，規格為 60V 、 3A 。
- (4) 熱電偶與資料擷取器(data logger)：熱電偶採 K-type，Omega KMQX-040-G 之不鏽鋼包覆之熱電偶，溫度擷取裝置為 FLUKE HYDRA Series II，兩者搭配之溫度解析度為 0.1°C 。
- (5) 配備高倍放大鏡頭之 CCD 攝影機：紀錄蒸發過程中水位的變化與動態行為。
- (6) 真空幫浦(vacuum pump)：本研究採用油式幫浦，其真空極限為

8×10^{-3} Torr。

- (7) 燒結爐(sintering furnace)：燒結爐採用振華電熱公司製作的管狀氣氛燒結爐，其程式控制器可控制加熱曲線，最高加熱溫度可達 900°C ，而爐內鋼管的尺寸為長 120 cm、直徑 10 cm，爐管內外部各放置一支 K-type 熱電偶用來量測爐管內外的溫度。
- (8) 導熱膏(thermal grease)：Corning TC-5021，熱傳導係數為 3.5 W/mK。
- (9) 彈簧壓力座(pressing coil)：單一彈簧係數為 0.5 kg/m。整體壓力控制於 3~5 kg。



2.3 實驗步驟

2.3.1 前置作業

前置作業流程可分為三大流程：(1)清洗流程、(2)燒結流程、(3)注水流程。分別說明如下，

- (1) 清洗流程：將實驗物件置入超音波震盪儀分次以除油劑、RO 水洗滌，最後以丙酮去水使用氮氣吹乾，避免物件氧化。
- (2) 燒結/還原流程：使用自製夾具將銅板與毛細結構固定，並置入高溫燒結爐內，加熱溫度為 $900^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ ，加熱時間與持溫時間皆控制為 1 個半小時，之後開始自然冷卻至室溫便可取出。

(3) 注水流程：注水架構如圖 2.5 所示，將工作流體注入玻璃管內，並開啟真空幫浦抽至壓力計顯示為 10^{-2} Torr 為止，接著開啟注水閥件，注入適當水量後關閉閥件，以保持腔體內真空。

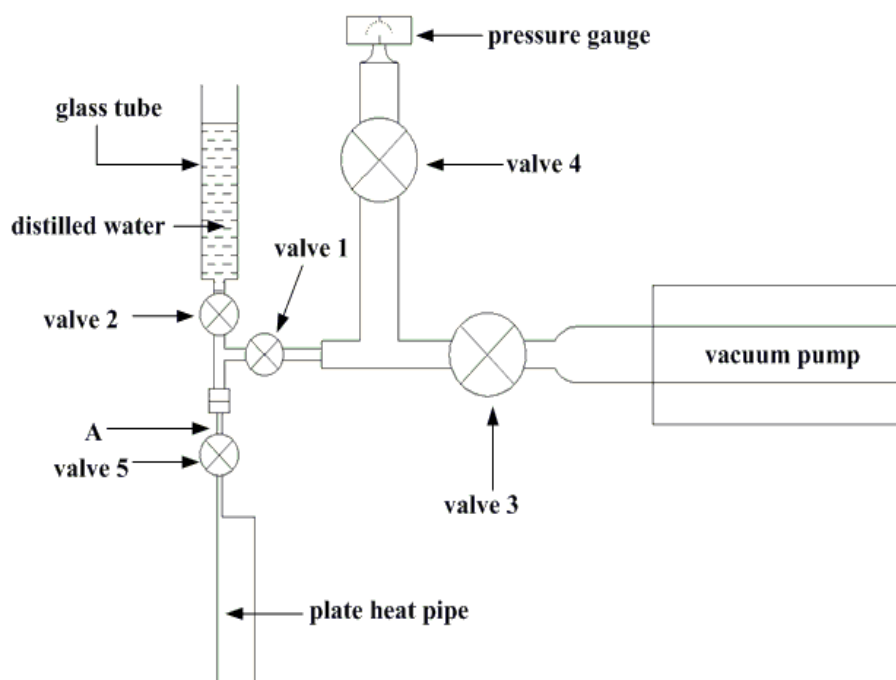


圖 2.6 注水設備示意圖

2.3.2 注水量之選擇

本研究之實際注水量會顯著大於溝槽之飽和水量(0.3ml)，主要原因為部分工作流體在操作過程中會卡在熱管內部角落與接縫內，在冷凝區玻璃內表面也會附著少量冷凝水，因此實驗過程中偶而會使用熱風機排除玻璃表面之冷凝水。本實驗室[4,5]在燒結多層銅網與銅粉毛細蒸發器中發現不同之注水量，有不同之操作極限，但不影響其最低熱阻。本研究嘗試使用不同之水量注入實驗容器內，其結果發現若注

水過多(1ml 以上)，因實驗容器設計造成之邊角積水，有時發生沸騰或快速擾動的現象，但此積水區非一般操作中熱管之情形，且水量太多覆滿溝槽時，抑制溝槽毛細之蒸發現象，並使得約 60%熱從銅板傳遞，故不予採用。另一方面發現若注水太少（0.6ml 以下），因各流道之獨立性，部份溝槽無法潤濕，使該實驗欠缺合理性，不予採用。本研究依經驗找出不同工作流體之適當的填充量，其中水為(0.8ml)、甲醇為(0.7ml)、丙酮為(0.7ml)。

2.3.3 實驗流程

本研究之實驗從 10W 左右開始進行，之後以 3~5W 的間隔增加加熱瓦數。本研究定義之穩態為 5 分鐘各點溫度跳動範圍在 0.2℃ 之內。每一組瓦數進行至穩態之後，便移開蒸發區上端的絕熱棉以拍攝內部熱傳機制。整個操作過程直至蒸發熱阻值往上升或乾化為止。

2.4 實驗數據處理

1. 總輸入瓦數(Q_t)

$$Q_t = I \times V$$

其中 I ：電流； V ：電壓，由電源供應器得知。實際輸入的瓦數則是由 T1、T2 之溫度梯度計算獲得，誤差量控制於 5% 左右。

2. 熱損失百分率、蒸發熱阻、等效熱傳係數之計算

本研究利用 4mm 厚之無氧銅板作為平板熱管之底板，在熱源接觸面周圍銑入 Π 型溝槽，如圖 2.7。以避免熱量藉由銅板傳遞，但由實驗量測結果發現並非所有的熱都藉由工作流體相變化帶走，仍然有少量的熱經由銅板傳導遞至冷凝區，其熱傳遞路徑如圖 2.8 所示。

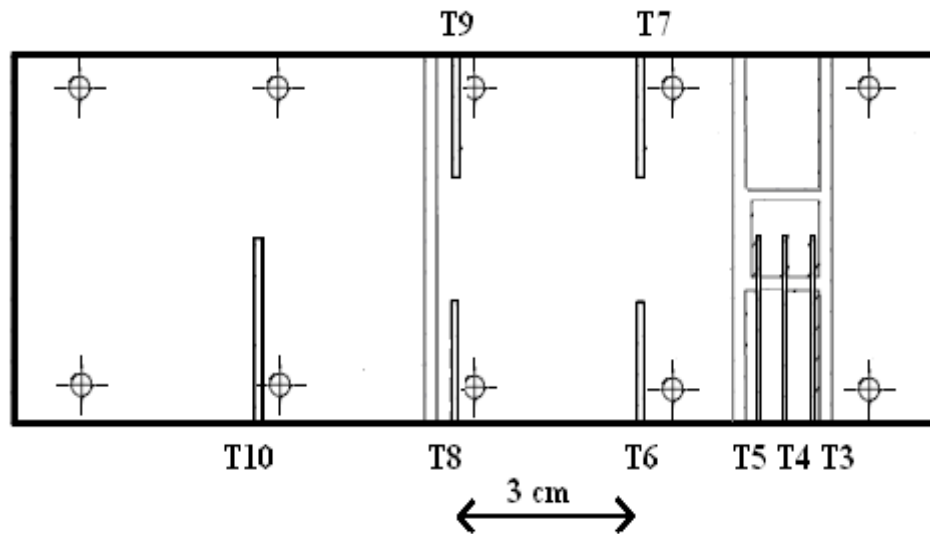


圖 2.7 熱電偶埋入位置

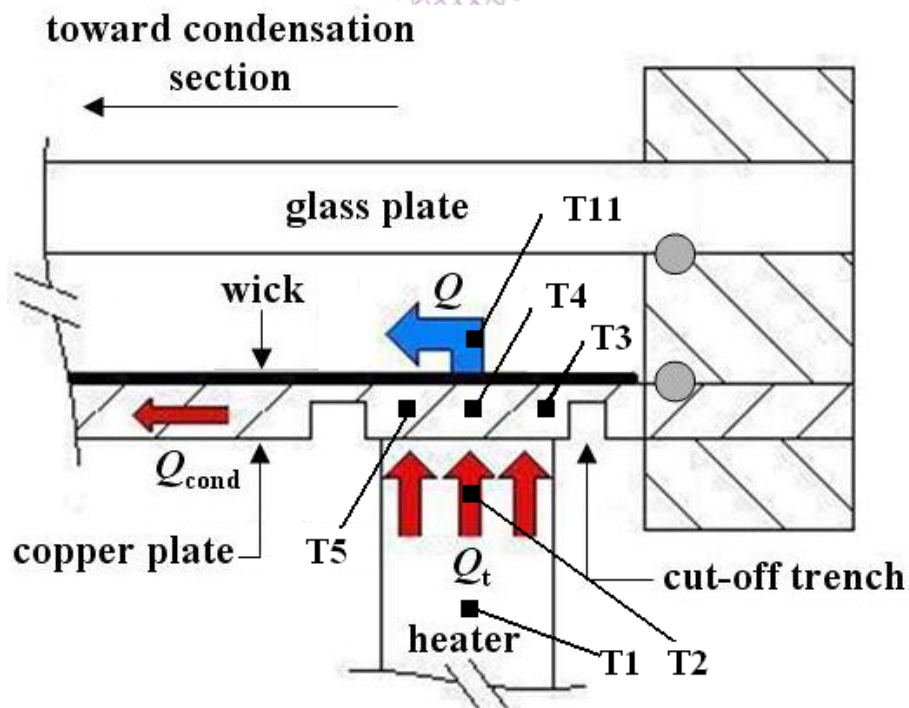


圖 2.8 熱經由銅板傳導遞至冷凝區

本研究在銅板絕熱區中埋入 4 個溫度點 T6~T9，如圖 2.8，以計算銅板傳遞之熱量(Q_{cond})；利用 Q_{cond} 即可得到相變化所帶走之熱量(Q)以及因為銅板效應所造成的熱損失，稱之為熱損失百分率(percentage of plate heat loss, PPHL)，

$$Q = Q_t - Q_{\text{cond}}$$

$$\text{PPHL} = (Q_{\text{cond}} / Q_t) \times 100\%$$

所以本研究實際計算之蒸發熱阻與等效熱傳係數為

$$R_e = (T_4 - T_{11}) / Q \quad (\text{K cm}^2/\text{W})$$

其中實驗量測 Q 與 R_e 之實驗誤差約為 7%。本實驗的經驗顯示 PPHL 較大之原因有二：一為溝槽在低瓦數為滿水位，且蒸發之熱傳量小，故銅板之側向熱傳比例較大；二為蒸發區乾化後，經由銅板之熱傳途徑比例上升。因此可藉由 PPHL 推斷蒸發熱阻之趨勢。本研究以水為工作流體控制在 10% 以內，丙酮與甲醇則在 20% 以內。

第三章 結果與討論

3.1 溝槽毛細之蒸發區觀察

本研究使用蝕刻之U形溝槽毛細，觀察溝槽式熱管在加熱區工作流體之蒸發與水膜之動態現象。為了解其中機制，在觀察前將先了解未潤濕之溝槽毛細與潤濕之溝槽毛細之間之差異。使用 LED 白色光源照射溝槽毛細，並由 CCD 顯微鏡擷取影像，可得影像如圖 3.1、3.2。

圖 3.1 為乾溝槽之影像，可發現其中有若干光影，**abcd**為U形溝槽橫截面之曲率變化處，由上方打光時，易使光線聚集，由溝槽上方觀察時，**ad**區域呈現銅色線條。**x**處為溝槽蝕刻後產生之粗糙表面，呈現顆粒狀反光。

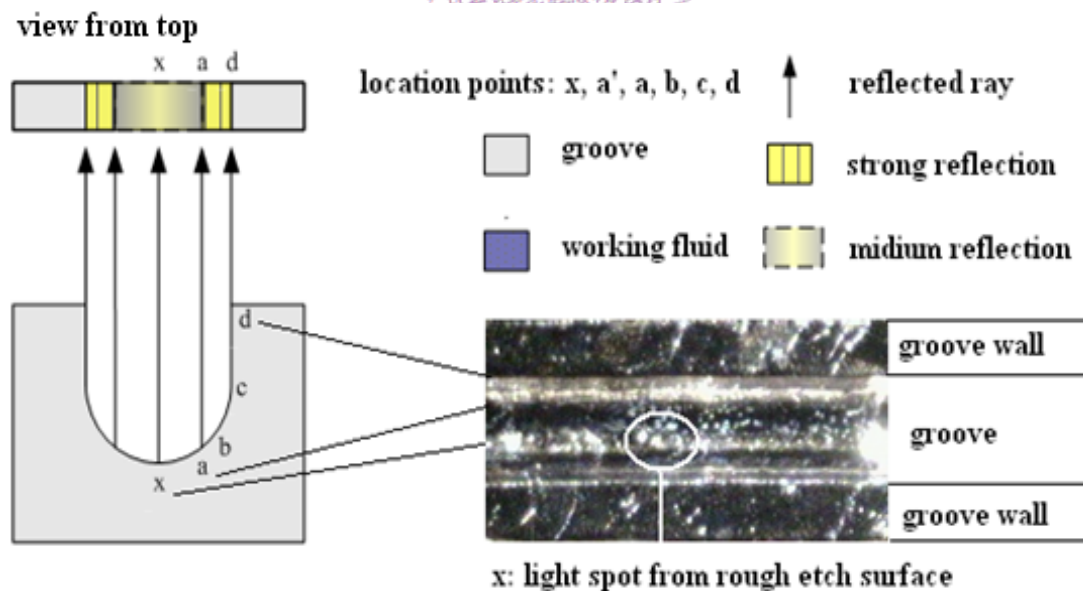


圖 3.1 乾溝槽

相較乾溝槽，溝槽中裝滿液體時，光線經液體介質會產生折射。其中 20℃ 時水、甲醇、丙酮之折射率分別為 1.333、1.360、1.329，

因此觀測到相近反光的濕溝槽。圖 3.2 以水為例，此介質使原本乾溝槽亮區 \overline{abcd} 的反射光線折射，由溝槽上方觀察，可以發現 $\overline{a'd}$ 區域呈現銅色線條，此時乾溝槽之反射光影比較，銅色區域變大。並比較 x 區域的粗糙表面經光線折射後的光影，由上方觀察其反射光影則呈現較大較模糊之顆粒。

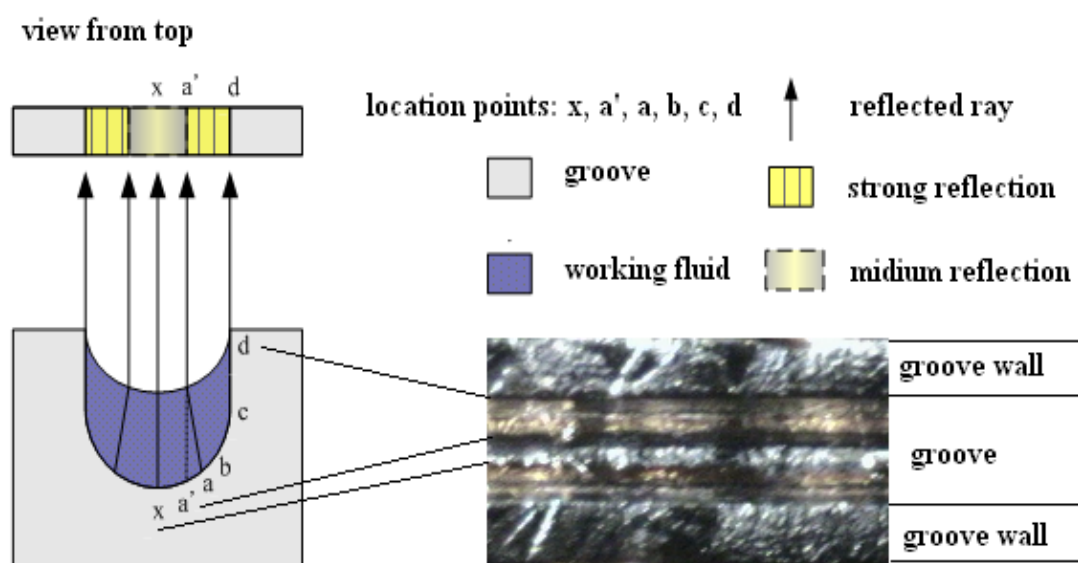


圖 3.2 濕溝槽

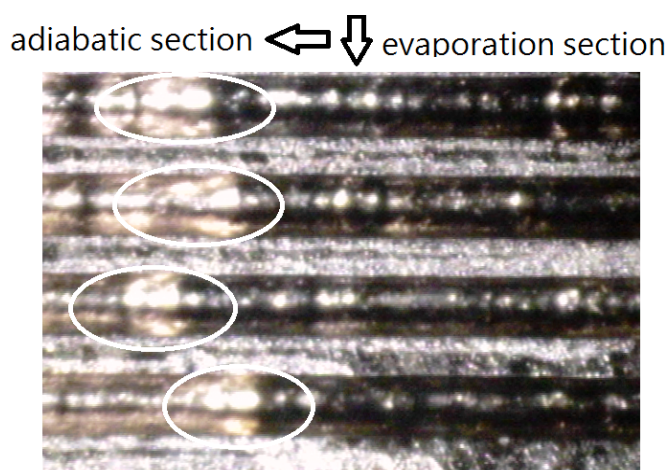


圖 3.3 蒸發區上方之聚光性端部(←adiabatic section：表←左方為絕熱區；↓ evaporation section：表此區域為蒸發區)

實驗時隨著加熱瓦數增加時，加熱區在某一瓦數觀察到一聚光性端部，每個溝槽的聚光性端部有點參差不齊，差距大多數集中在 1mm 以內，如圖 3.3。此聚光性端部隨著加熱瓦數變大時會向冷凝區移動，這部分將於 3.2.1 節追蹤聚光性端部出現後隨瓦數的移動情況。

有趣的事，穩態時有些溝槽的聚光性端部會往復運動。推測冷凝區忽有大量之工作流體凝結於某溝槽上，因溝槽毛細流阻小，工作流體迅速輸送至蒸發區，此時聚光性端部會衝至前方。但蒸發區前端處之底板溫度較高，使過頭之工作流體迅速蒸發，當溝槽毛細之毛細壓不足以支撐蒸發所需之流量時，聚光性端部將退至後方。

在使用甲醇、丙酮較使用水為工作流體時，其聚光性端部往復運動的個數、頻率、振幅皆比較大，且當聚光性端部退離蒸發區時，振幅變短。其原因為甲醇、丙酮的表面張力與黏滯力較小，若該處有局部壓力不平衡，就會造成聚光性端部較劇烈之動態模式。此外甲醇、丙酮的蒸發潛熱較小，在解相同之加熱瓦數時，需要較大的流量，也是動態模式較明顯的原因。實驗時發現由熱電偶量到的底板溫度，不隨聚光性端部往復運動改變。在實驗觀察上發現，溝槽毛細之聚光性端部的平均位置也不會隨著各溝槽之聚光性端部往復運動改變。顯示各溝槽之間互相補足，達成動態的熱平衡。

本研究發現溝槽中之聚光性端部，其後方光影沿縱向則無明顯變

化，如圖 3.4 顯示水、甲醇、丙酮的聚光性端部前後方的影像。由其聚光情況推論，其液膜形狀在此短距離內為很彎曲之凹面，由此發現當工作流體在溝槽中受熱蒸發時，溝槽中水位在聚光性端部附近應有很大之變化，因此可以判斷當溝槽蒸發區中有聚光性端部的出現時，蒸發區為半乾化狀態。

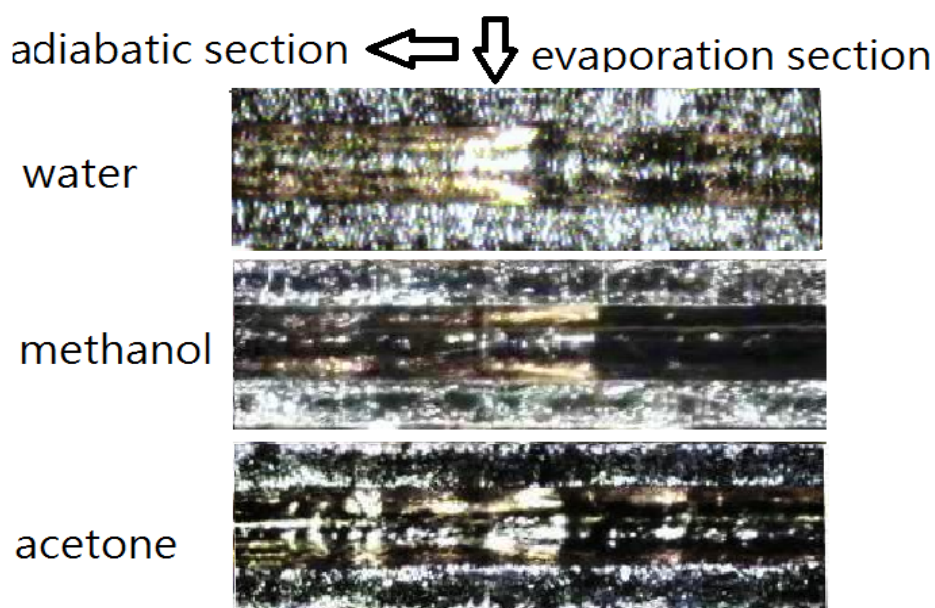


圖 3.4 水、甲醇、丙酮之聚光性端部

Nilson et al.[10]針對長方形溝槽的理論研究中指出，工作流體在溝槽中受熱蒸發時，溝槽水位會有急劇變薄的現象。原因為溝槽壁上方之兩角落容易抓水，因此擁有很強之毛細力。當溝槽中工作流體受熱蒸發時，因角落抓水的效果，使水位駐留在高水位，但液膜會沿軸向位置逐漸彎曲。當此毛細壓不足以供應蒸發之流量時，水位將因重力效應突降至溝槽中。此部份之研究與本研究觀察到之聚光性端部所顯示水位具急劇變化的現象頗為相似。

3.2 溝槽毛細操作中之蒸發熱阻量測與觀察

3.2.1 選用水為工作流體

本實驗組 a、b、c、d、e 在適當的注水量（0.85ml）下，操作瓦數由 10W 加至 28W，每 3W，量測一次蒸發熱阻，如圖 3.5，其平均熱損失在 13%之內，如圖 3.6。

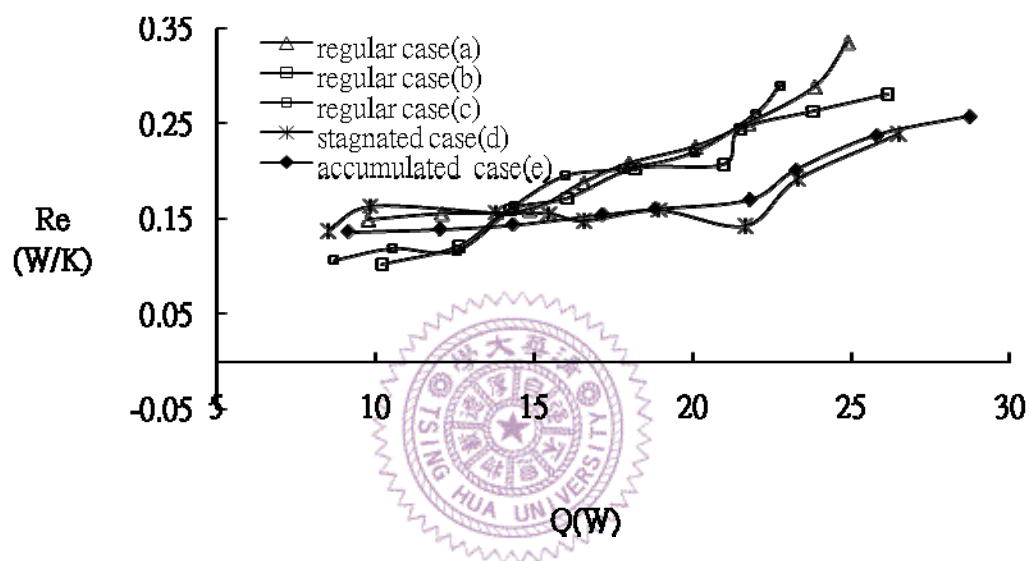


圖 3.5 水之實驗組之蒸發熱阻

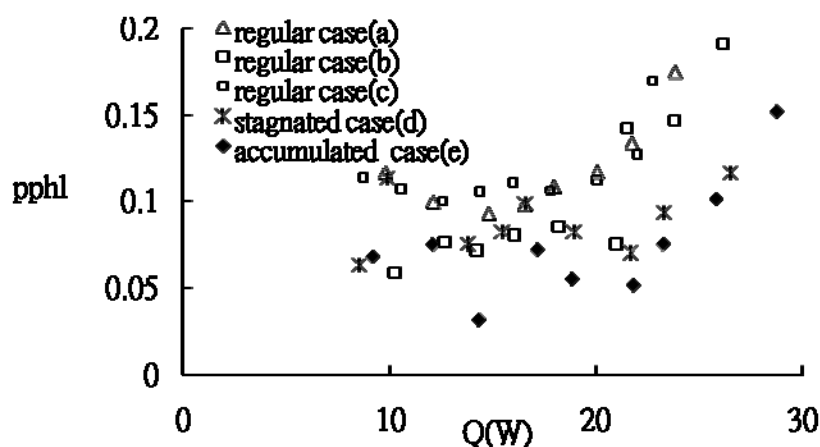


圖 3.6 水之實驗組之熱損失

圖 3.5 顯示蒸發熱阻隨著加熱瓦數遞增，因溝槽中只有單方向之

補充流，並只有兩側溝槽壁有薄膜蒸發區，加上本溝槽之毛細力較小，故蒸發區容易在低瓦數就乾化

本實驗組之在 15~18 瓦數之間於加熱區附近出現聚光性端部，之後隨著瓦數增大往冷凝區移動，當聚光性端部逐漸退離蒸發區時，蒸發區的薄膜蒸發區域將因此減少，蒸發區平均乾化長度越長，熱阻越大。圖 3.7 顯示聚光性端部出現後之移動過程，其中定義在 $-5.5\text{mm} < L < 5.5\text{mm}$ 區間為蒸發區，蒸發區中心為 $L=0\text{mm}$ ，蒸發區底板安置三之熱電偶 T3、T4、T5 以量測底板與蒸氣之過熱度，其位置分別位於 $L=-4.5\text{mm}$ 、 0mm 、 4.5mm ；而在 $5.5\text{mm} < L < 50\text{mm}$ 區間為絕熱區。

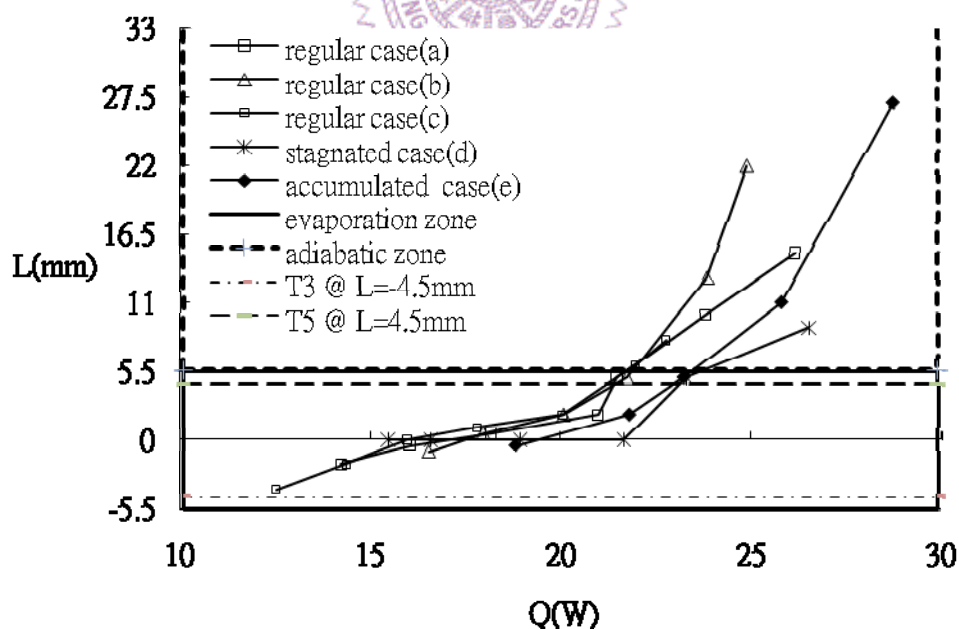


圖 3.7 水之實驗組之聚光性端部出現之瓦數與位置對應

圖 3.5 中顯示熱阻呈現兩種類型：類型一為 a、b、c；類型二為 d、

e。對照圖 3.7 發現，在類型一實驗均發現聚光性端部逐漸往冷凝區退水後熱阻上升；而類型二中如實驗 d 在 16~20W 中，聚光性端部滯留於加熱區；而實驗 e 發現聚光性端部逐漸往冷凝區退水後，而溝槽加熱區的蝕刻痕跡上仍殘留局部且不規則分布之水反光。推測可能溝槽的溝角流持續補充蒸發的損失，而不會使光影消失，可參見圖 3.8，為 20W 時情況。當操作狀態到了更高瓦數時，這些光影會消失，顯示蒸發區完全乾化。值得一提的是，工作流體是否會在蒸發區有殘留或滯留的現象為隨機性。由實驗 d、e 可知，若尚有水在蒸發區時可減緩熱阻上升之趨勢，此外未發現有沸騰現象。

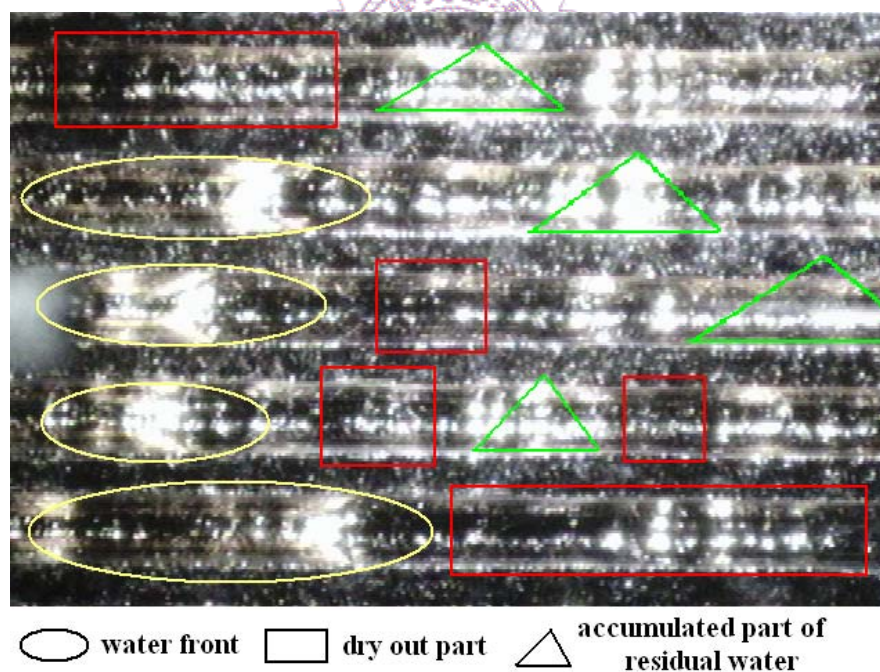


圖 3.8 觀察聚光性端部通過後仍有發現殘留水影

另一方面，本研究在加熱區設置 3 枝熱電偶(T3、T4、T5)如圖 3.7，以量測聚光性端部離開後，是否造成溫升效果。經實驗發現加

熱區溫度 $T3 \approx T4 \gg T5$ ，並隨著瓦數上升，其中過熱度的量測以蒸氣溫度為參考值， $T3 \approx T4$ 表示蒸發區絕熱良好。圖 3.9 顯示實驗 a、d、e 之聚光性端部出現之瓦數與位置。圖 3.10、圖 3.11、圖 3.12 分別表示實驗 a、d、e 之過熱度在聚光性端部位出現後的變化。其中聚光性端部未出現或未通過該溫度點位置時以實心點表示；聚光性端部通過後以空心點表示。在類型一的實驗 a 中，當聚光性端部離開後過熱度會升溫；而在類型二的實驗 d 中，聚光性端部在蒸發區滯留，滯留其間過熱度將沒甚麼變化，但當完全乾化後，過熱度明顯上升。而在類型二的實驗 e 中，蒸發區仍有殘留的水，亦導致蒸發區過熱度升溫不明顯，但到了完全乾化後，過熱度明顯上升。因此可由過熱度隨瓦數變化，是否有明顯的轉折，判斷蒸發區是否有工作流體駐留的現象。

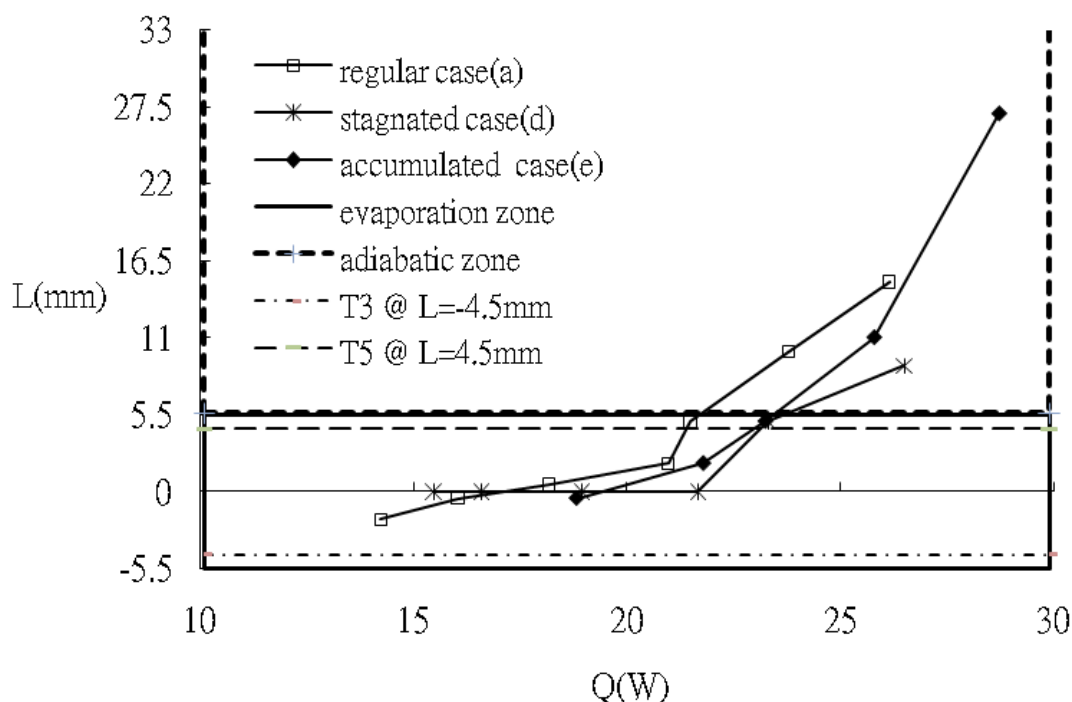


圖 3.9 a、d、e 實驗中聚光性端部出現之瓦數與位置

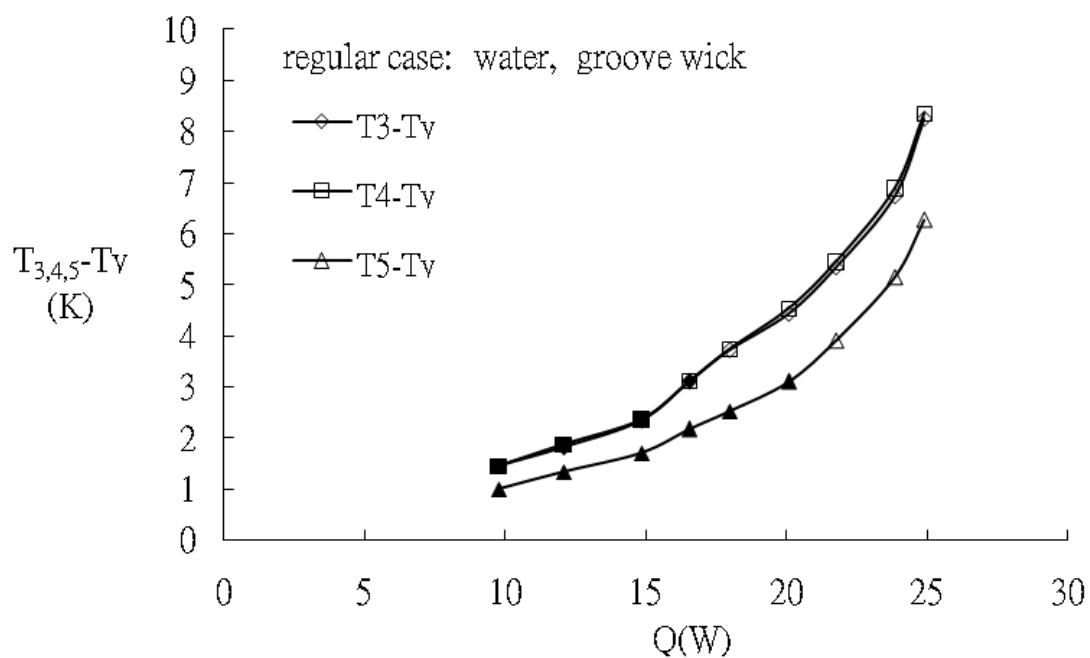


圖 3.10 實驗 a 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應

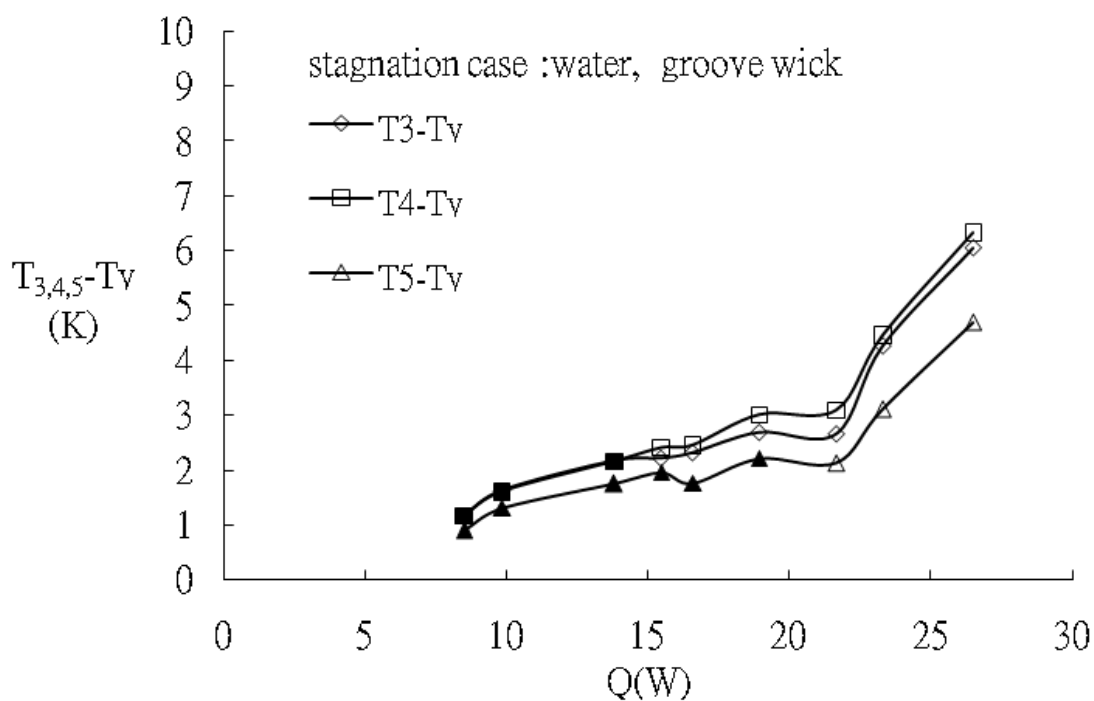


圖 3.11 實驗 d 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應

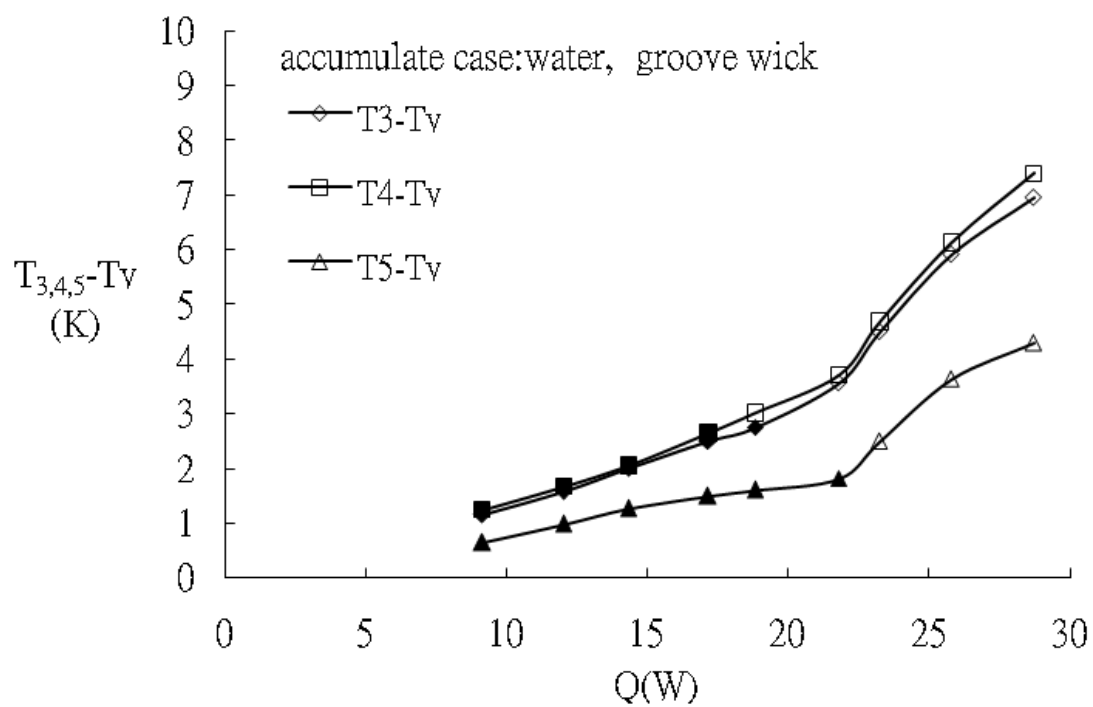


圖 3.12 實驗 e 聚光性端部出現前後之過熱度與瓦數對應



3.2.2 選用甲醇、丙酮為工作流體

Chi[2]根據工作流體之蒸發潛熱、黏滯力等因素，提出工作流體之性能參數(figure of merit) N

$$N = \rho\lambda\sigma/\mu$$

其中 $N(\text{甲醇}) > N(\text{丙酮})$ ，本研究在甲醇、丙酮之適當注水量 (0.7ml) 下操作，瓦數由 5W 加至 25W，每 3W，量測一次蒸發熱阻，如圖 3.13，其平均熱損失在 17%之內，並探討其熱傳極限的差異現象，如圖 3.14。

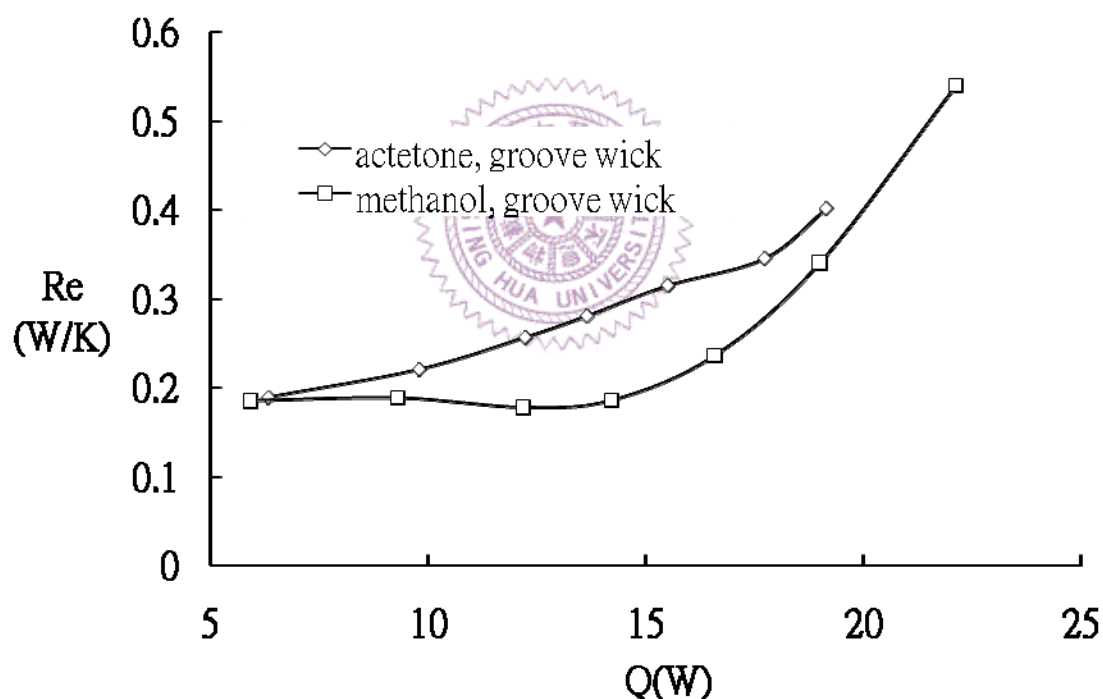


圖 3.13 甲醇、丙酮蒸發熱阻之比較

圖 3.13 顯示甲醇之蒸發熱阻較低，其原因為甲醇之表面張力較丙酮大，因此可與金屬壁維持較長且面積較大的薄膜蒸發區，故蒸發熱阻較低。

當選用甲醇、丙酮為工作流體時，操作瓦數逐漸增大，亦會出現聚光性端部。當溝槽中開始出現丙酮聚光性端部的操作瓦數，比甲醇聚光性端部的操作瓦數低，如圖 3.14。於 3.1 節曾說明聚光性端部是一種乾化現象，這裡可以由工作流體的性能參數，解釋丙酮的性能略差。圖 3.15、圖 3.16 顯示使用甲醇、丙酮的操作瓦數與蒸汽一底板過熱度，當聚光性端部通過底板之溫度點後，該溫度點與過熱度亦有上升之趨勢。

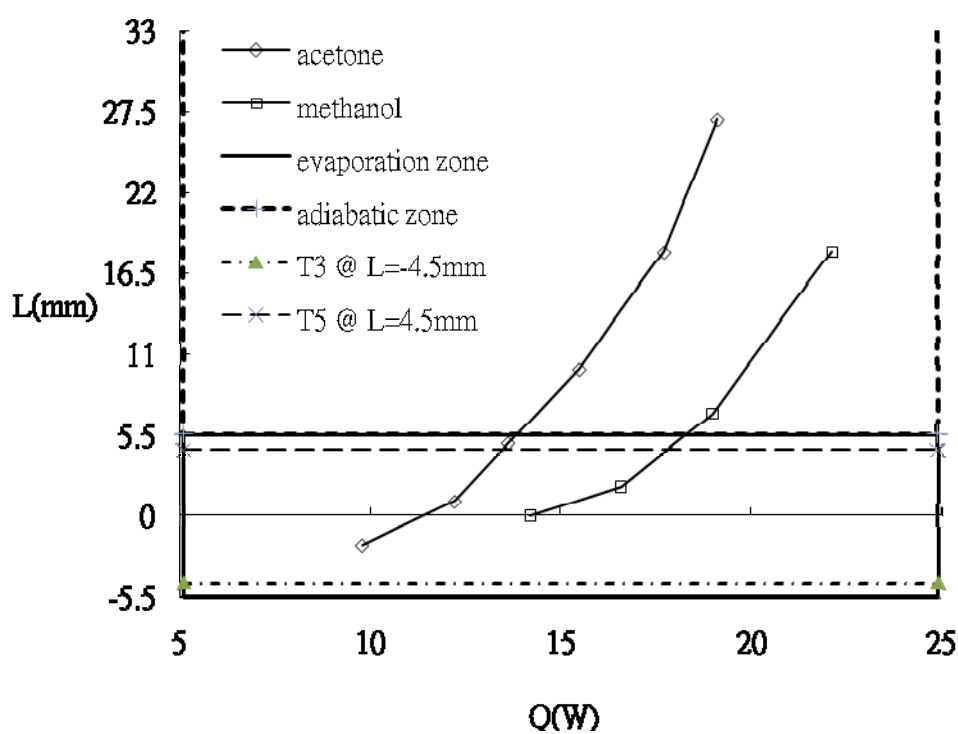


圖 3.14 甲醇、丙酮之聚光性端部出現之瓦數與位置對應

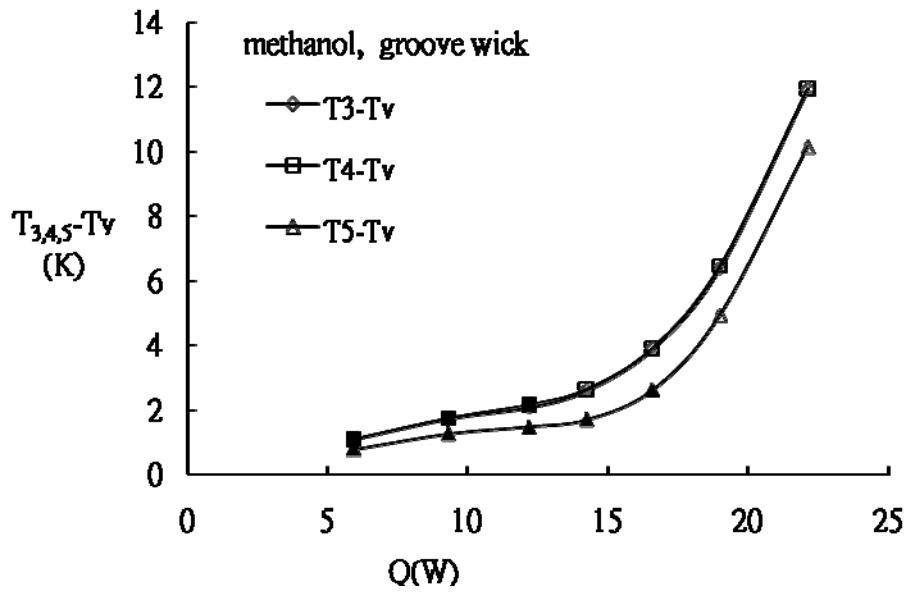


圖 3.15 聚光性端部出現前後甲醇之過熱度與瓦數對應

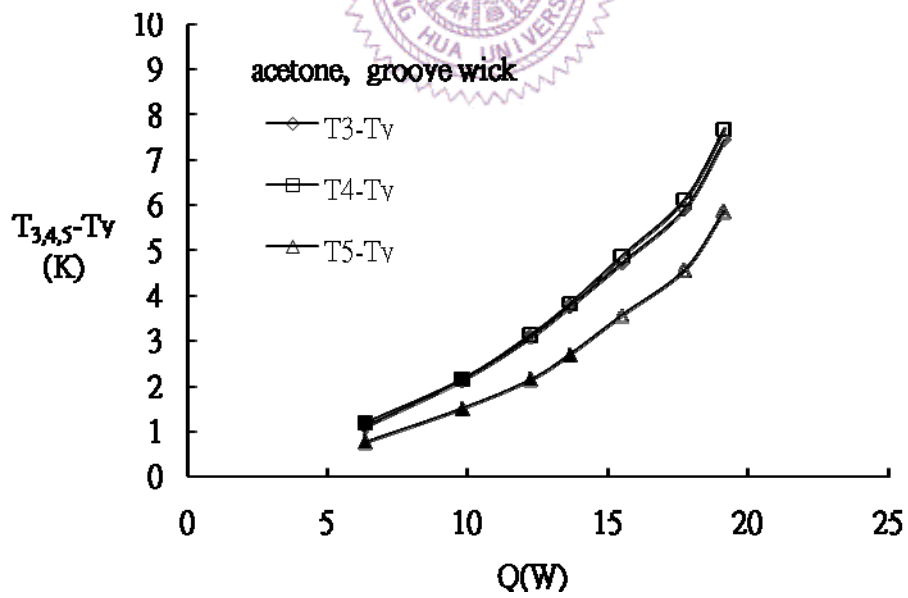


圖 3.16 聚光性端部出現前後丙酮之過熱度與瓦數對應

3.3 溝槽燒結粉末毛細之操作中熱阻量測

本研究使用粒徑小於 $78\mu\text{m}$ 之細不規則粉燒結於加熱區，如圖 2.3a、b，本節將與 3.2 節之溝槽毛細做性能比較，且觀察是否會有沸騰發生。本實驗組之注水量亦是水 0.85ml、甲醇 0.7ml、丙酮 0.7ml。

3.3.1 選用水為工作流體

本實驗組的熱損失在 13% 之內。蒸發熱阻與使用相同填充量之純溝槽毛細比較時，在相同操作瓦數下蒸發熱阻明顯較低，如圖 3.17。其原因為蒸發區之燒結粉擁有更多薄膜蒸發區，燒結粉提供之額外熱傳途徑，將有效降低熱阻值。燒結粉末之溝槽毛細的蒸發熱阻仍隨瓦數遞增，原因不明，但以性能來看，此複合式毛細仍可於 60W 時維持 0.3W/K 的熱阻。

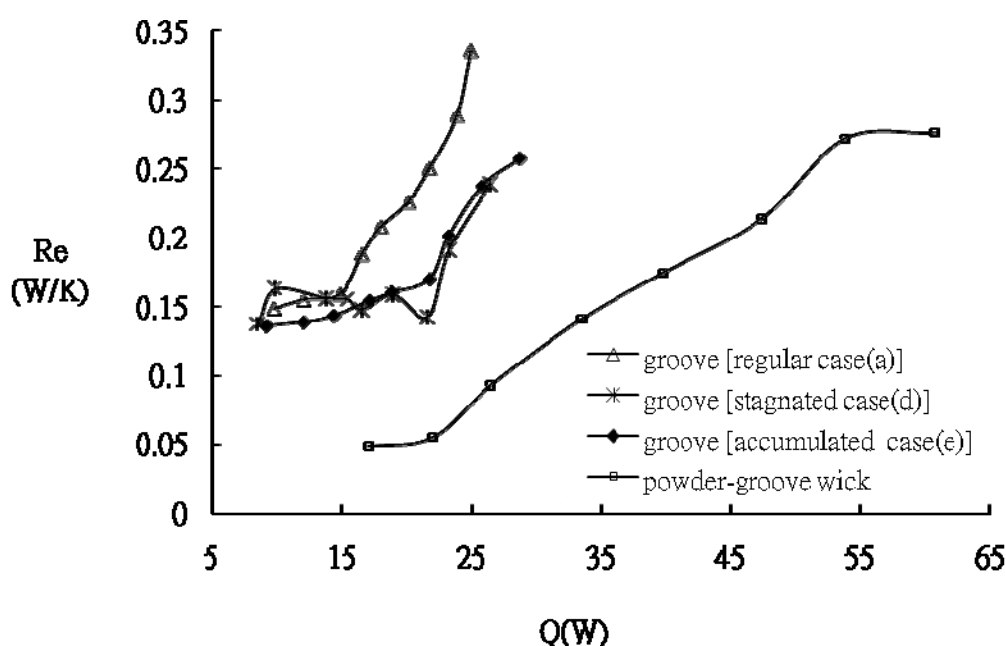


圖 3.17 不同毛細之蒸發熱阻(水)

3.3.2 選用甲醇、丙酮為工作流體

本實驗組的熱損失在 17% 之內。亦方現蒸發熱阻仍隨瓦數遞增，但與使用相同填充量之純溝槽毛細比較時，在相同操作瓦數下蒸發熱阻較低，如圖 3.18。其原因為蒸發區之燒結粉擁有更多薄膜蒸發區。但熱阻的改善幅度卻不如使用水操作，其原因為甲醇、丙酮的表面張力比水小，因此能與金屬壁面維持的薄膜蒸發區之長度皆比水短，故蒸發熱阻沒明顯的改善。此外分別選用甲醇 0.7ml、丙酮 0.7ml 為工作流體亦發現在相同操作瓦數下，使用甲醇操作時蒸發熱阻較低，再次驗證使用甲醇的性能優於丙酮。

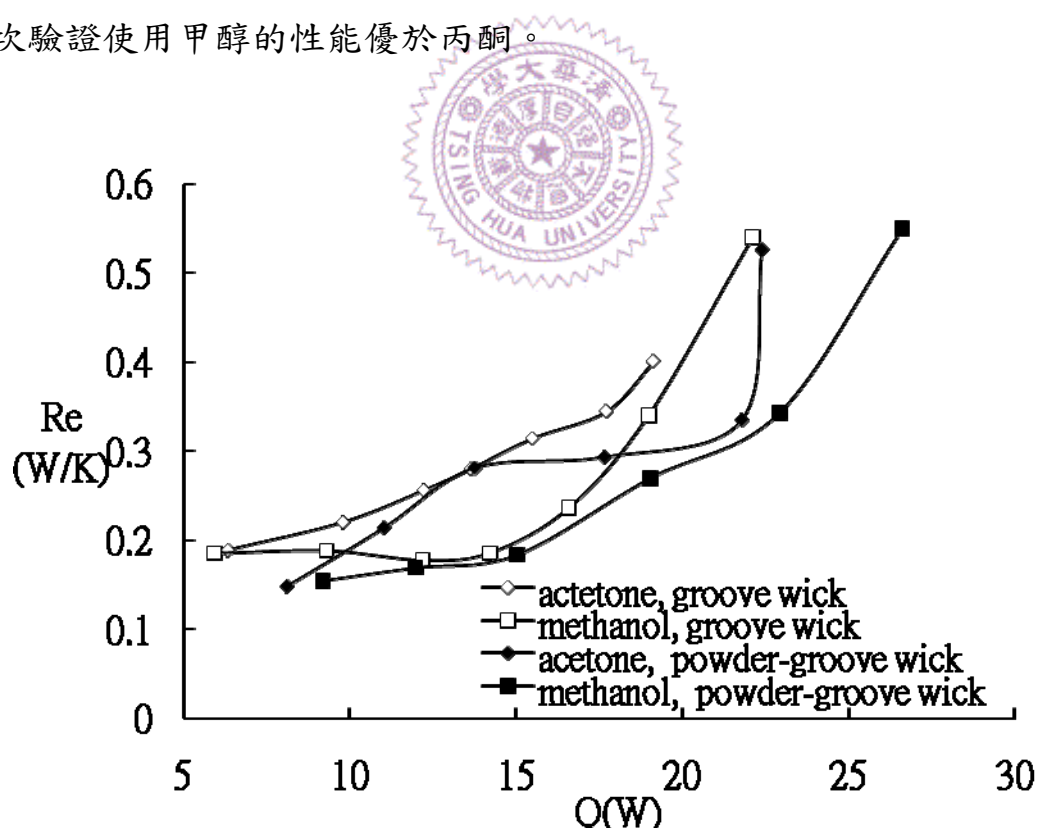


圖 3.18 不同毛細與工作流體實驗組之蒸發熱阻

3.4 溝槽毛細之冷凝區觀察

不同工作流體在冷凝端方面：只有水在冷凝端發生明顯滴式凝結；甲醇、丙酮則無。其原因為水與銅之接觸角為 10° ，而甲醇、丙酮則為 0° 。其中水之冷凝過程為：數滴小液滴凝結在溝槽壁上，其次液滴結合成大液滴，最後液滴破裂灑進溝槽中，而溝槽壁上殘留的小液滴將繼續下一個循環，如圖 3.19。使用甲醇、丙酮時，於冷凝區觀察時沒有任何液滴的形成，如圖 3.20，推測該冷凝機制為薄膜凝結。

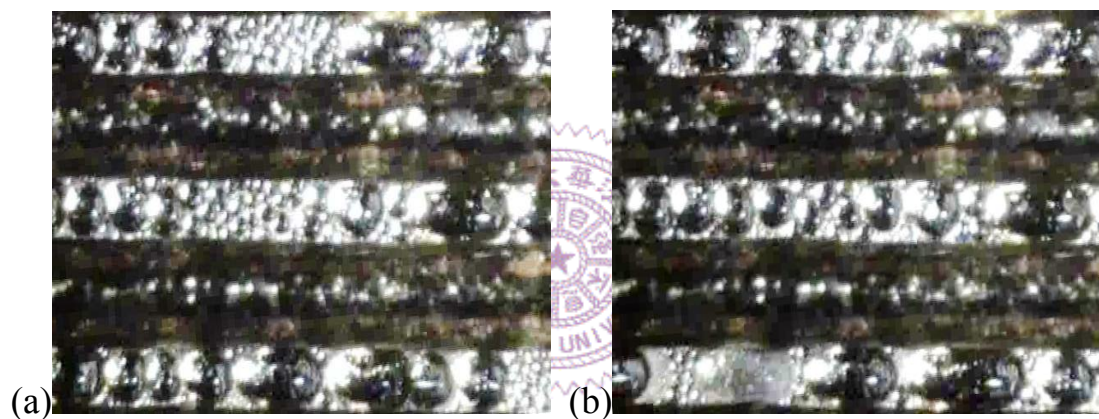


圖 3.19 水冷凝端滴式凝結之觀察

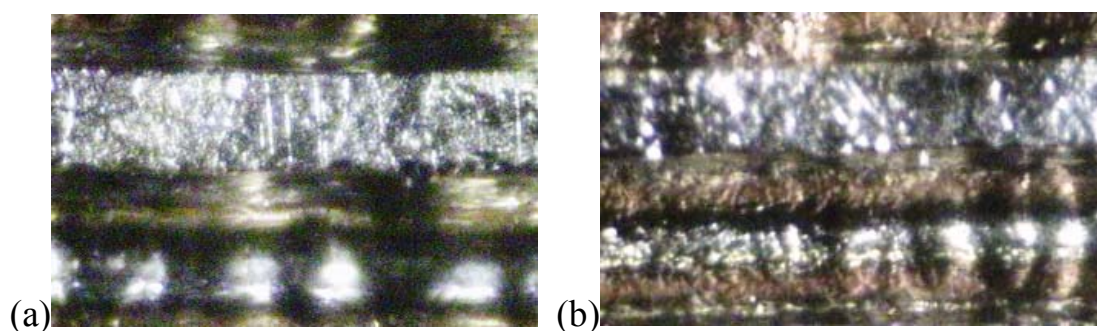


圖 3.20 (a) 甲醇、(b) 丙酮之冷凝區

此外發現水之冷凝區域，滴式凝結之頻率隨冷凝區位置不同而不同。所以水的冷凝區為非均勻之冷凝現象。由非均勻冷凝現象可驗證

當某一溝槽忽有大量冷凝液時，會使工作流體快速輸送至蒸發區，促成在聚光性端部蒸發區產生往復運動。而在使用甲醇、丙酮為工作流體時，其蒸發區亦有此往復運動，因此推測，甲醇、丙酮的冷凝區是非均勻性的薄膜冷凝。



第四章 結論

本研究使用可視化之平板熱管，研究具平行溝槽毛細結構之平板熱管蒸發區在操作中發生的現象。溝槽截面為 U 形，寬 0.25mm、深 0.16mm，採用的工作流體分別有水、甲醇、或丙酮。另亦包括於蒸發區燒結細銅粉的複合式毛細結構。

本研究發現溝槽式熱管選用不同工作流體（水、甲醇、丙酮）進行實驗，隨著加熱瓦數增加時，加熱區在某一瓦數形成一聚光性端部，且每溝槽之聚光性端部，參差不齊，有時會往復運動。聚光性端部，為液膜在短距離迅速彎曲變厚效果，當聚光性端部平均位置通過底板溫度點時，底板過熱度會明顯上升，因此推斷當溝槽蒸發區中出現聚光性端部時，蒸發區為部分乾化。

本研究之蒸發熱阻隨著加熱瓦數遞增，因溝槽中只有單方向之補充流，並只有兩側溝槽壁有薄膜蒸發區，加上本溝槽之毛細力較小，故蒸發區容易在低瓦數就乾化。實驗操作時選用水為工作流體時，因水之表面張力與黏性較大，當聚光性端部經過溝槽之蝕刻痕跡時，有時會使工作流體在蒸發區滯留或殘留，此時將可緩衝蒸發熱阻隨加熱瓦數遞增。

其中使相同水量之甲醇、丙酮操作時，當溝槽中出現聚光性端部時之操作瓦數，丙酮之瓦數先於甲醇，顯示甲醇性能優於丙酮。另一

方面甲醇的表面張力較大，可與銅壁維持的薄膜蒸發區較長，因此熱阻較小。

選用 0.85ml 水、0.7ml 甲醇、0.7ml 丙酮分別操作在溝槽毛細與溝槽燒結粉毛細中，因溝槽燒結粉毛細擁有更多薄膜蒸發區，因此在相同操作瓦數下所測到之熱阻值比較低。

此外在操作時選用甲醇、丙酮、水與上述兩種毛細操作時，皆沒觀察到沸騰現象。

在冷凝區方面，只有操作時選用水為工作流體，發生明顯之滴式凝結，而甲醇、丙酮則無此動態模式。



參考文獻:

- [1] G.P. Peterson, An Introduction to Heat Pipes, Modeling, Testing, and Applications, Wiley, 1994.
- [2] S.W. Chi, Heat Pipe Theory and Practice, McGraw-Hill, 1976.
- [3] R. Hopkins, A. Faghri, D. Khrustalev, Flat Miniature Heat Pipes With Micro Capillary Grooves, J. Heat Transfer 121 (1999), 102-109
- [4] K. H. Do, S. J. Kim, S. V. Garimella, A mathematical model for analyzing the thermal characteristics of a flat micro heat pipe with a grooved wick, Int. J. Heat Mass Transfer 51 (2008) 4637 - 4650
- [5] S. J. Kim, J. K. Seo, K. H. Do, Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and the thermal optimization of a miniature heat pipe with a grooved wick structure, Int. J. Heat Mass Transfer 46 (2003) 2051 - 2063
- [6] S. Anand, S. De, S. Dasgupta, Experimental and theoretical study of axial dryout point for evaporation from V-shaped microgrooves, Int. J. Heat Mass Transfer 45 (2002) 1535 - 1543

- [7] Y. Tang, D. Deng, L. Lu, M. Pan, Q. Wang, Experimental investigation on capillary force of composite wick structure by IR thermal imaging camera, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 190 – 196.
- [8] S.-W. Chen, J.-C. Hsieh, C.-T. Chou, H.-H. Lin, S.-C. Shen, M.-J. Tsai, Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of micro-grooves made by different processes, *Sensors and Actuators A* 139 (2007) 78 – 87.
- [9] J.-H. Liou, C.-W. Chang, C. Chao, S.-C. Wong, Visualization and thermal resistance measurement for the sintered mesh-wick evaporator in operating flat-plate heat pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (2010) 1498-1506.
- [10] S.-C. Wong, J.-H. Liou, C.-W. Chang, Evaporation resistance measurement with visualization for sintered copper-powder evaporator in operating flat-plate heat pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (2010) 3792-3798.
- [11] S. Lips, F. Lefèvre, J. Bonjour, Nucleate boiling in a flat grooved heat pipe, *Int. J. Thermal Sciences* 48 (2009) 1273 – 1278.

- [12] F.W. Holm, S.P. Goplen, Heat transfer in the meniscus thin film transition region, ASME J. Heat Transfer 101 (1979) 543 – 547.
- [13] G.R. Stroes, I. Catton, An experimental study of the capillary performance of triangular versus sinusoidal channels, ASME J. Heat Transfer 119 (1997) 851 – 853.
- [14] R.H. Nilson, S.W. Tchikanda, S.K. Griffiths, M.J. Martinez, Steady evaporating flow in rectangular microchannels, Int. J. Heat Mass Transfer 49 (2006) 1603 – 1618.
- [15] A.J. Jiao, H.B. Ma, J.K. Critser, Evaporation heat transfer characteristics of a grooved heat pipe with micro-trapezoidal grooves, Int. J. Heat Mass Transfer 50 (2007) 2905 – 2911.
- [16] H. Wang, S.V. Garimella, J.Y. Murthy, Characteristics of an evaporating thin film in a microchannel, Int. J. Heat Mass Transfer 50 (2007) 3933 – 3942.
- [17] H.K. Dhavaleswarapu, S.V. Garimella, J.Y. Murthy, Microscale Temperature Measurements Near the Triple Line of an Evaporating Thin Liquid Film, ASME J. Heat Transfer 131 (2009)

061501

[18] 劉睿凱, 王肇浩, 張長生, 白先聲, 複合式熱管開發應用研究, 熱管理產業通訊 2008 年第 9 期.

