

第四章 實驗結果與討論

平板熱管製作過程中，每一道手續如清洗、封裝以及真空條件等都對毛細結構親水性及熱管效能有極大的影響，這些因素都必須控制在相同的條件下，所得之數據方具有比較之意義。此外上板流道與毛細結構必須確實接觸並為毛細結構與銅壁提供足夠的接觸壓力，若兩者沒有確實接觸將導致底下幾項缺失而使實驗失敗：

- (1) 毛細結構與蒸發區銅壁接觸不完善，此點在第一及第二類毛細結構中將使蒸發區沸騰所需之壁過熱度增加，使平板熱管效能降低，文獻[13]也有強調此點。
- (2) 工作流體循環路徑有部份區域中斷，使得流阻相對增加。
- (3) 上板流道與毛細結構未接觸的部份可能會形成積水，降低該區域之冷凝效果。

平板熱管之效能一般以等效熱傳導係數或平板熱管熱阻 R_{vc} 來表示，本研究採用後者作為評斷效能的依據，透過量取平板熱管蒸發區及冷凝區之溫度與輸入熱量相除而得，其中輸入熱量部份可以透過電源供應器讀數或加熱塊之溫度梯度計算而得，當加熱面積為 $20*20\text{mm}$ 時，兩者差異在 5% 以內，顯示加熱器之熱損失不大。平板熱管效能深受蒸發沸騰特性與工作流體循環狀況所影響，這部份的關鍵參數有毛細結構、工作流體充填量及表面粗糙度等。此外在不更改加熱面積及鰭片散熱能力的情況下，平板熱管各部份熱阻僅有平板熱管熱阻 R_{vc} 會受實驗參數所影響，因此先針對平板熱管熱阻與參數間之關係作討論，稍後討論系統各部份熱阻，並與銅板作比較，底下就不同參數比較其對 R_{vc} 之影響。

4.1 第一類毛細結構之平板熱管效能

第一類毛細結構採用銅網直接與銅壁及上板流道接觸，主要測試 W100-1 及 W100-1&200-1 兩種毛細結構，其規格列於表 3.1，而工作流體參考充填量分別為 1.26c. c.、1.64c. c.。

4.1.1 充填量與熱管效能之關係

為了尋找毛細結構為 W100-1 之最佳充填量，測試了工作流體充填 1.17、1.51 及 1.81 等三種水量，結果顯示於圖 4.1。

充填 1.17c. c. 之平板熱管在低加熱量下有較低的平板熱管熱阻值 $0.086^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，隨著輸入熱量增加緩慢下降至 $0.072^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，然而在 320 瓦即發生乾化現象，依此判斷工作流體的充填量並不足夠。

充填 1.81c. c. 之平板熱管在低加熱量之平板熱管熱阻相較之下為最大，隨輸入熱量上升而緩慢下降，然而熱阻表現由始至終都較前者為差，這結果顯示充填量 1.81c. c. 顯然太多而導致液膜較厚，降低了熱管效能。

充填 1.51c. c. 之平板熱管之的平板熱管熱阻值由 $0.099^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，隨著輸入熱量增加緩慢下降至 280 瓦時的 $0.085^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；隨後加熱量增加，熱阻發生大幅下降到 $0.054^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 後隨加熱量增加再緩慢下降至最低熱阻約 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。推測沸騰現象可能在低加熱量為熱傳效果較差的對流熱傳，而高加熱量時則轉換到熱傳效果較佳的核沸騰或薄膜蒸發模式。此外熱傳極限由於電源供應器功率所限僅能測到 450 瓦，無法確實測出，而以一般電子冷卻而言，如此大的輸入熱量並不常見，因此較合理的工作流體充填量應介於 1.2~1.5c. c. 之間。

毛細結構 W100-1&200-1 之測試結果顯示於圖 4.2，測試了 1.22c. c.、1.47c. c.、1.57c. c. 與 1.69c. c. 等不同充填量，根據結果判斷合理工作流體充填量約在 1.4~1.6c. c. 之間。在低加熱量時之熱阻表現，除了充填量 1.22c. c. 之水量顯然特別少而有較低熱阻，其他三種充填量在低加熱量時熱阻值差不多，約 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，隨加熱量增加平板熱管熱阻值變化不大，直到較高加熱量時發生沸騰模式轉換後才有明顯下降，而充填量越多其熱傳極限也越高。

由圖 4.2 中亦可以看出充填量越少，沸騰模式轉換之起始加熱量也越小，若和文獻[20] Thermacore 所顯示之效能相較，很顯然的低加熱量部份仍有相當大的改善空間，此外本研所得之熱阻與加熱量關係圖中在 200~300 瓦間有明顯驟降(推測為沸騰模式轉換之起始加熱量)，當充填量較少時驟降點有提早發生之趨勢，然而熱阻驟降現象在眾多文獻中並未觀察到，其發生原因尚不明確。

一般來說最佳充填量約等於毛細結構內孔隙體積，而本實驗結果卻顯示最佳充填量必須視平板熱管操作條件而定，充填量低伴隨而來的是低熱阻與低熱傳極限，適用於低加熱量之操作；反之充填量大則會犧牲些許熱阻值，卻得到極大之熱傳極限。此外根據這兩種毛細結構整體熱阻表現發現差異並不明顯，換言之，相較於厚度，充填量對效能的影響比較顯著。

4.1.2 粗糙度對熱管效能之影響

前段以兩種毛細結構針對平滑面所作之測試在低加熱量之熱阻表現都比不上文獻[20]所提供之數據 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ($Q = 100\text{W}$ 時)，因此利用美工刀刻意製造粗糙表面，預期可以降低沸騰所需之壁過熱度，

沸騰模式轉換之起始加熱量也可以消除或提早發生。

圖 4.3 為毛細結構 W100-1 在粗糙面之平板熱管熱阻與輸入熱量圖，測試了數種充填量，在圖中我們可以觀察其合理充填量範圍在 1.3~1.5 之間，其中 1.6l.c.c. 即屬於充填過多的情形，和圖 4.1 相較，在充填量上所得結果相近。在平板熱管效能表現上，以熱阻值與加熱量關係來看差異不大，低加熱量部份皆在 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 左右，高加熱量部份粗糙面之熱阻最低值有提早發生之現象（最低值約在 $0.04\sim 0.06^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ），亦即粗糙表面使核沸騰提前發生。圖 4.4 顯示兩種蒸發表面在充填量 1.5c.c. 左右之平板熱管熱阻與加熱量關係圖，由圖中更可以明顯看出粗糙面對沸騰模式轉換之起始加熱量之影響，而且熱阻驟降後使得應用在散熱裝置之散熱量操作範圍也更充裕。

毛細結構 W100-1 & 200-1 在粗糙面的測試結果顯示於圖 4.5 及圖 4.6，合理充填量與蒸發表面光滑或粗糙之關係不明顯，充填範圍仍在 1.4~1.6c.c. 之間，至於粗糙面與沸騰模式轉換之起始加熱量之影響在圖中並未被觀察到，這部份推測是因為底層 200 目細銅網所能提供沸騰成核址較 100 目銅網為多，而透過粗糙面雖然也能增加一些成核址，但影響不若單層 100 目銅網明顯，因此無法從熱阻上觀察出光滑面與粗糙面之差異，此外圖 4.6 中可以觀察到粗糙面有提供額外毛細力使乾化延後發生之功能。

由此部份針對粗糙度的實驗可得知，粗糙面在網目較大之毛細結構有較大之影響力，尤其在沸騰模式轉換之起始加熱量上最為顯著，但對於底層為細網目之毛細結構所造成之影響並不明顯，此外對於充填量幾乎沒有影響。

4.2 第二類與第三類毛細結構之平板熱管效能

第一類毛細結構厚度皆很小(0.2~0.3mm)，在熱傳極限及效能上就有不差之表現，故本研究並未針對此類型毛細結構較大之毛細厚度進行測試，然而其結果仍有幾項有待改進，包括(1)低加熱量時熱阻仍不夠理想，(2)沸騰模式轉換之初始加熱量過大，(3)高加熱量之熱阻值尚有進步空間等。透過燒結程序預期可以改善毛細結構本身的熱傳導能力、毛細力、增進沸騰現象等，進而改善平板熱管之效能。底下針對銅板與銅網一併燒結與否區分成第二類及第三類毛細結構：

4.2.1 第二類毛細結構-燒結銅網/粗糙表面

第二類毛細結構是將數層銅網先經過燒結過程後，形成”一層”毛細結構，之後如同第一類毛細結構般以堆疊的形式與上板流道及蒸發區銅壁接觸。燒結後毛細結構相較於第一類之毛細結構有較強之毛細力，上下層銅網間亦額外提供較多之沸騰成核址，此外上下層銅網間接觸較佳，可以強化毛細結構本身的熱傳導能力，此點將使液面蒸發能力較佳，預期可以增加平板熱管之效能，且於加工製程上並不會增加太多程序或困難。此外在前一段實驗發現粗糙面對於沸騰現象或是熱管效能皆有益無害，故此段實驗之蒸發區表面皆為粗糙面。

實驗測試了數種銅網搭配而成之毛細結構，包括Ws75-1&200-1 (2.44/1.91 c.c.)、Ws100-3&200-3 (4.12/2.87 c.c.) 及 Ws100-1&200-2 (1.96/1.96 c.c.) 等三種，括號中水量顯示為實驗水量/參考充填量，其詳細規格列於表 3.1，而結果顯示於圖 4.7。當輸入熱為 80 瓦時，熱阻值約 0.1~0.11°C/W 之間，輸入熱量大於 400 瓦時平板熱管熱阻則降至 0.025~0.03°C/W；除了毛細結構為

Ws75-1&200-1 略差，但仍有 $0.37^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

低加熱量時三種毛細結構之效能差異不大，雖然彼此毛細厚度差異很大，但是毛細結構與蒸發區銅壁接觸條件皆相同（最底層皆為 200 目細銅網），原因可能如文獻[15]中所提，不同厚度之毛細結構，液汽接觸面積（工作流體蒸發面積）差異不大；高加熱量時除了 Ws75-1&200-1 較差外另兩種幾乎相同，猜測其原因為 Ws75-1&200-1 毛細結構是一層粗網與一層細網燒結而成，相較於其他兩種皆有數層細銅網燒結，毛細結構所能提供之成核址大小範圍及數量皆遜於其他兩種毛細，故高加熱量之熱阻表現略差。

整體熱阻表現和文獻[20]提供之數據相較，熱阻隨加熱量之趨勢和文獻中相似，但低加熱量時本研究之測試結果較差，高加熱量部份則是本研究較佳。此外圖中最低熱阻皆發生於最大測試加熱量（非熱傳極限），表示充填量可能屬於較多之情形。至於沸騰模式轉換之起始加熱量則皆有大幅降低之現象，顯示燒結之毛細結構對於平板熱管之效能確有助益。

4.2.2 第三類毛細結構-銅網與銅板一併燒結/光滑表面

此類之毛細結構將銅板與銅網一併燒結，而粗糙面可能會因不平整而不利於毛細結構與銅板之接觸，因此這部份先針對平滑面進行燒結，將來仍會嘗試將銅網燒結於粗糙表面。

使用毛細結構為 WS100-1&200-4，將其與銅板經過清洗後以夾具提供適當之燒結接觸壓力，進行燒結程序；上流道板則是以酸洗作處理，這部份是顧慮到經過燒結之程序將使其材質軟化，不利於實驗重複使用。參考充填量約 2.3c.c.，至於合理充填量仍待實驗來尋找，

目前僅有一組數據，其充填量為 2.1c.c.，其實驗結果顯示於圖 4.8。

由圖中顯示，在低加熱量部份熱阻值為 $0.077^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，之後緩緩下降，當輸入熱量為 200 瓦時熱阻大幅下降至 $0.043^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，當加熱量大於 360 瓦時其值在 $0.31^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，熱傳極限依然受限於電源供應器極限而未被測出。實驗結果在低加熱量部份和前兩類毛細結構相比已大幅降低，應是毛細結構與銅板透過燒結使得兩者間的接觸熱阻大幅下降；高加熱量部份平板熱管熱阻之表現比第一類毛細結構佳，但與第二類差異不大。在高加熱量時熱阻較小的可能原因有二：(1)高加熱量時沸騰較強，汽泡產生與脫離造成強烈的熱對流效應；(2)輸入熱量較大時，大量的工作流體汽化導致液面下降至毛細結構中，此時不僅液膜厚度減小，且工作流體與毛細結構間將形成許多半月形液膜而使有效蒸發面積大幅增加，此兩效應使得熱阻大幅下降。詳細的原因仍有待深入研究。



4.3 平板熱管效能與 3mm 厚銅板之效能比較

4.3.1 平板熱管各部份熱阻

前段經由實驗尋找一參數組合可以使平板熱管有最佳之效能，然而在不改變加熱面積或是鰭片散熱能力下，除了總熱阻會受平板熱管熱阻所影響外，其他如熱沉熱阻 R_{hs} 及接觸熱阻 R_c 並不受其影響，根據一系列測試結果所得：

(1)當加熱面積為 $20\text{mm} * 20\text{mm}$ ，不改變風扇的情形下，鰭片熱阻 R_{hs} 與加熱量之關係並不明顯，其值在 $0.13\sim 0.14^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

(2)當加熱面積為 $20\text{mm} * 20\text{mm}$ ，接觸熱阻會因為每次塗佈之導熱膏

狀況不一所影響，而加熱量增加會使其值小幅增加，高加熱量之接觸熱阻約比低加熱量之值高 10~15%，而低加熱量時接觸熱阻其值範圍在 0.04~0.08°C/W。

總熱阻部份為平板熱管熱阻、熱沉熱阻及接觸熱阻三部份之和，以毛細結構 WS100-1&200-4 為例，其各部份熱阻與加熱量之關係顯示於圖 4.9。

4.3.2 平板熱管與 3mm 厚銅板之均溫性比較

許多文獻及其實驗結果都強調平板熱管之均溫特性，甚至不少人稱呼平板熱管為均溫片，本實驗透過鰭片上七各溫度量測點來判斷鰭均溫與否，結果顯示在低加熱量時最高溫度點(圖 3.6 由左方數來第四點)與最低溫度點(通常是最右側之點)差異小於 1°C，即便是高加熱量兩者差異極少超過 3°C，顯示本研究之平板熱管鰭均溫能力極佳。

最常和平板熱管作為比較的是同尺寸之銅板，但本實驗所設計之平板熱管因設計考量總厚度較大，此點已透過熱管底面洗槽來減少這部份之影響，因此在此用來和平板熱管比較之銅板其厚度採用 3mm，尺寸為 86*72(較鰭片每邊略大 3mm)。以毛細結構 WS100-1&200-4 與 3mm 銅板在鰭片上量得之溫度顯示於圖 4.10，其中以 80 瓦及 320 瓦這兩各輸入熱量作為低加熱量及高加熱量之代表。

4.3.3 平板熱管與 3mm 厚銅板之總熱阻比較

由於 3mm 銅板搭配鰭片的散熱系統中，鰭片上各點溫度差異極大，而鰭片上各表面的熱對流係數也不一樣，不適合以平均溫度和環境溫度之溫差來得到鰭片熱阻，此外接觸熱阻也沒有進行量測，故以

總熱阻來比較平板熱管與 3mm 銅板之散熱能力，其結果顯示於圖 4.11。平板熱管部份取三類型毛細結構測試結果中，各類型毛細結構較加之參數組合來與銅板進行比較，圖中顯示：

(1) 第一類毛細結構之效能在低加熱量較銅板略差，待相當高加熱量後沸騰模式轉換成熱傳能力較佳之核沸騰/薄膜蒸發，效能才優於銅板。

(2) 第二類及第三類毛細結構之平板熱管總熱阻在低加熱量時便與銅板不相上下，當加熱量大於 160 瓦後熱阻表現便遠勝過銅板，總熱阻之值由 $0.28^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降至 $0.23^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

以上測試結果均針對加熱面積為 $20\text{mm} * 20\text{mm}$ ，很明顯的第三類毛細結構目前之效能最佳，待透過更多之實驗測試後，找出第三類毛細結構較佳之參數組合，最後改變加熱面積測試此時最大熱通量及效能。

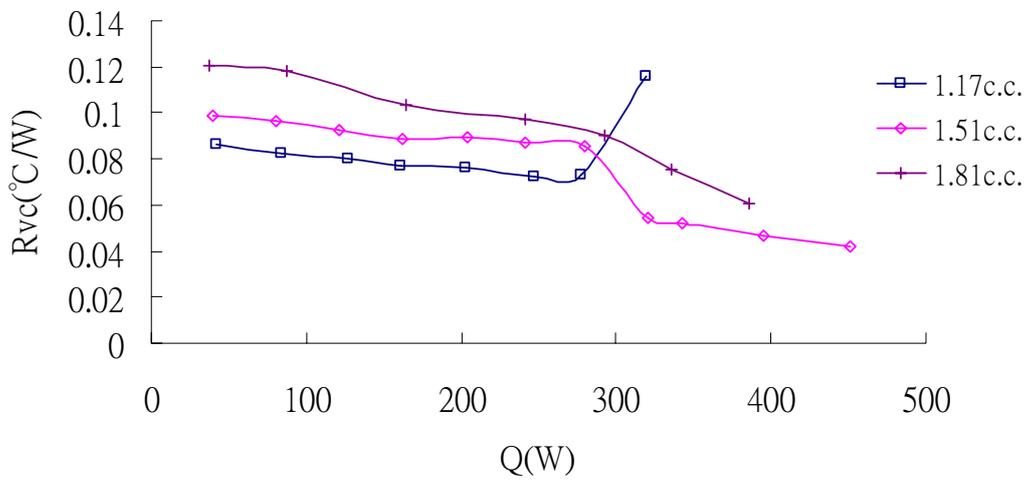


圖 4.1 毛細結構 W100-1 在不同充填量下平板熱管熱阻與輸入熱量圖

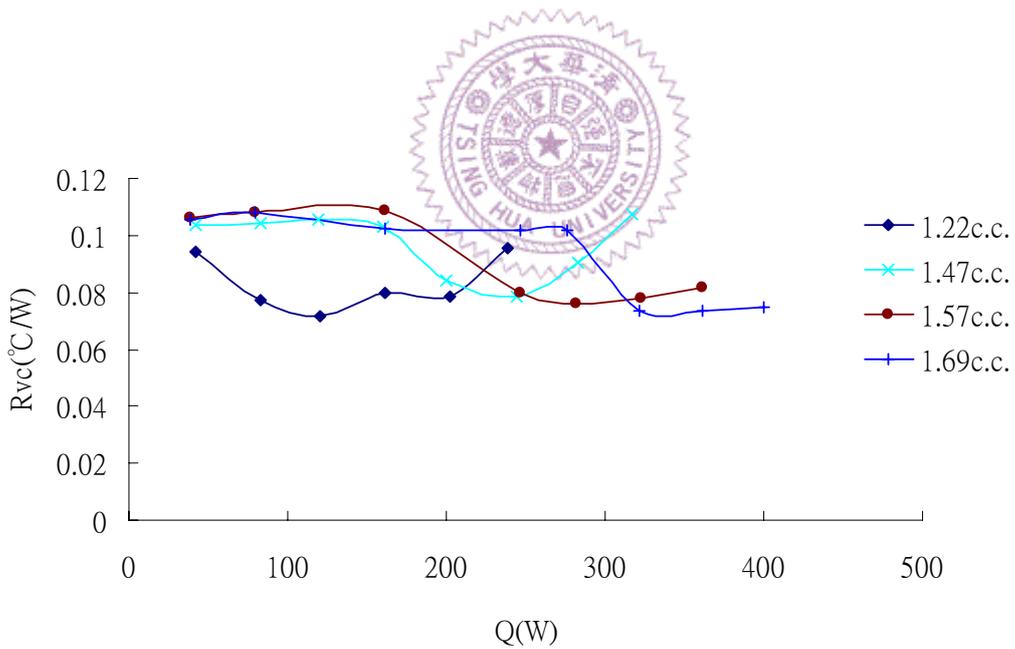


圖 4.2 毛細結構 W100-1&200-1 在不同充填量下平板熱管熱阻與輸入
熱量圖

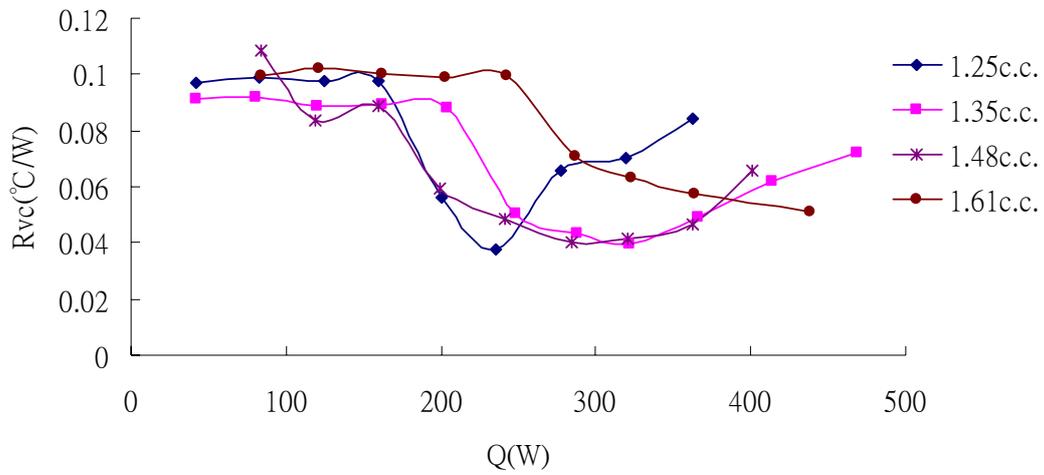


圖 4.3 毛細結構 W100-1 在粗糙面之不同充填量下平板熱管熱阻與輸

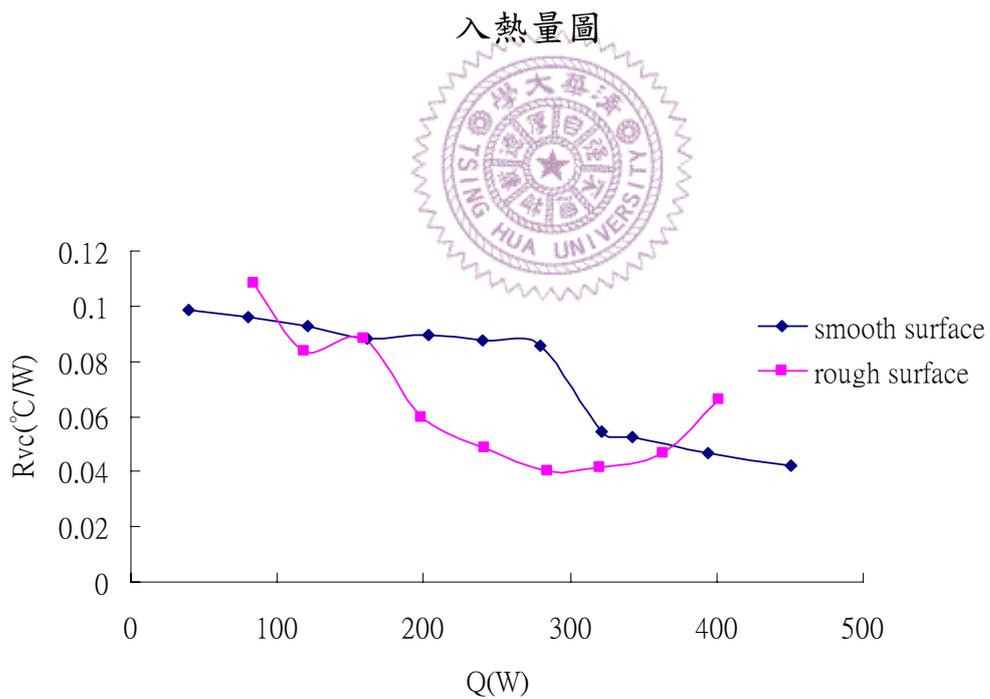


圖 4.4 毛細結構 W100-1 在不同粗糙面、相同充填量下平板熱管熱阻

與輸入熱量圖(注水量 1.5c. c.)

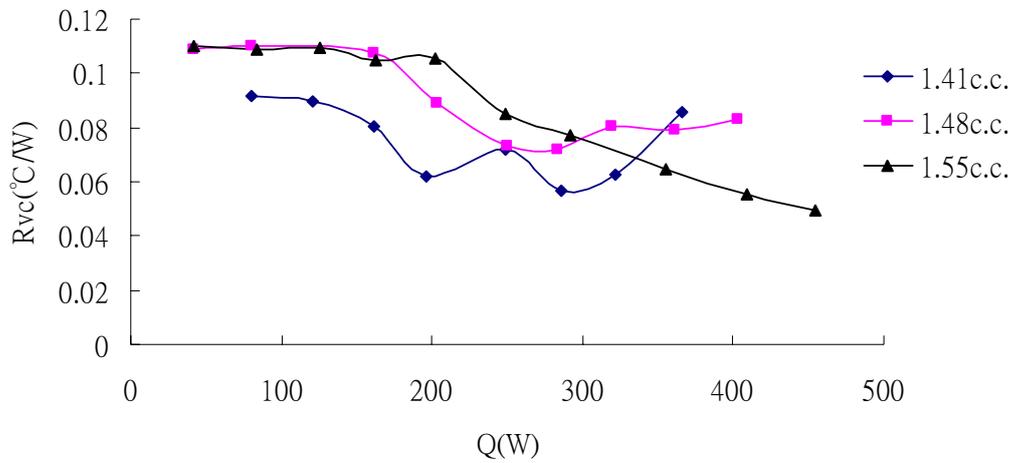


圖 4.5 毛細結構 W100-1&200-1 在粗糙面之不同充填量下平板熱管熱

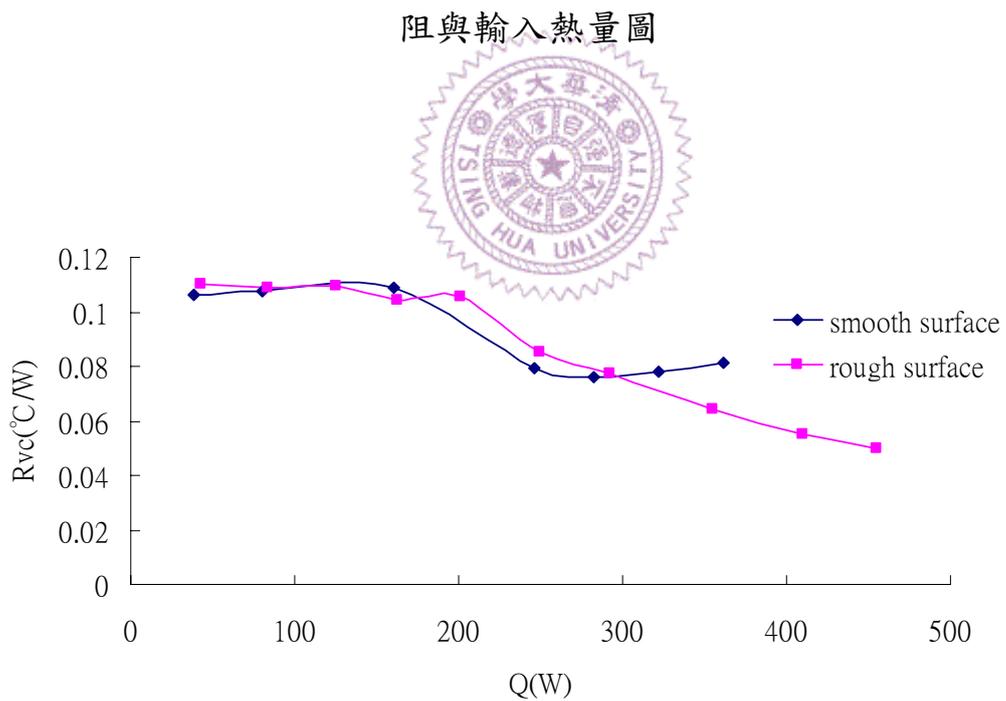


圖 4.6 毛細結構 W100-1&200-1 在不同粗糙面、相同充填量下平板熱

管熱阻與輸入熱量圖(注水量 1.55 c. c.)

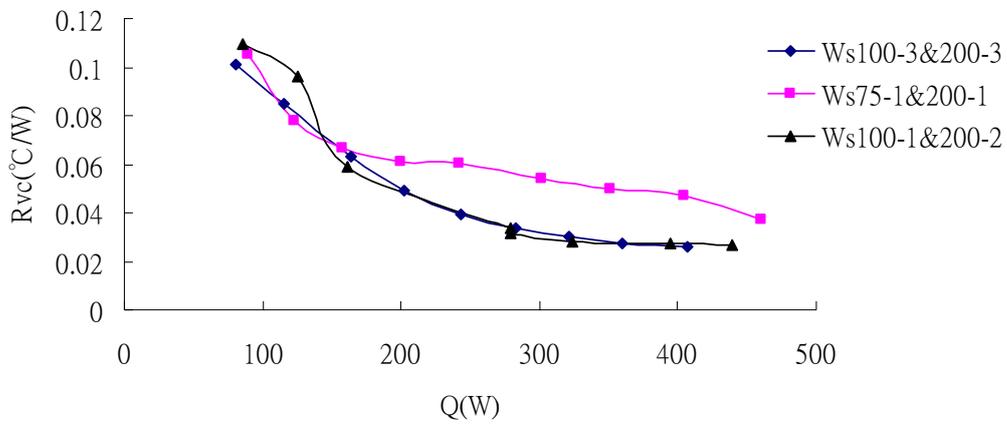


圖 4.7 第二類毛細結構，不同毛細結構之平板熱管熱阻與輸入熱量圖

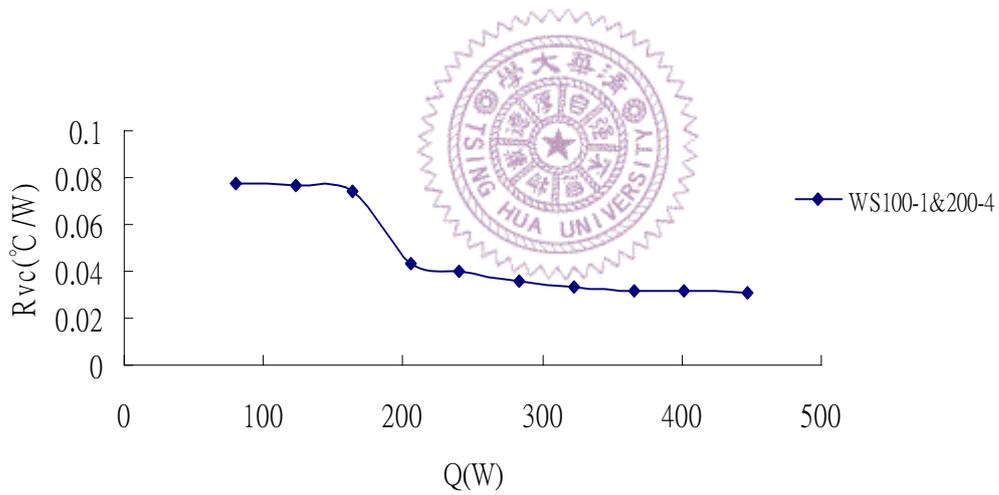


圖 4.8 第三類毛細結構，WS100-1&200-4 之平板熱管熱阻與輸入熱量

圖(注水量 2.1c.c.)

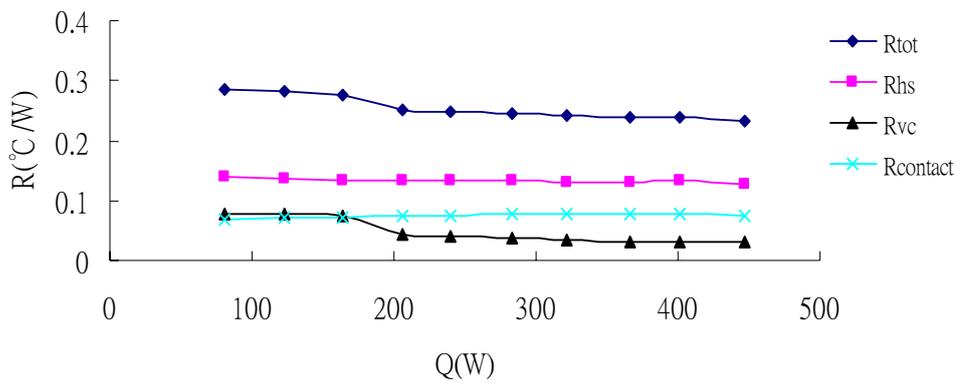


圖 4.9 第三類毛細結構 WS100-1&200-4，各部份熱阻與加熱量關係圖

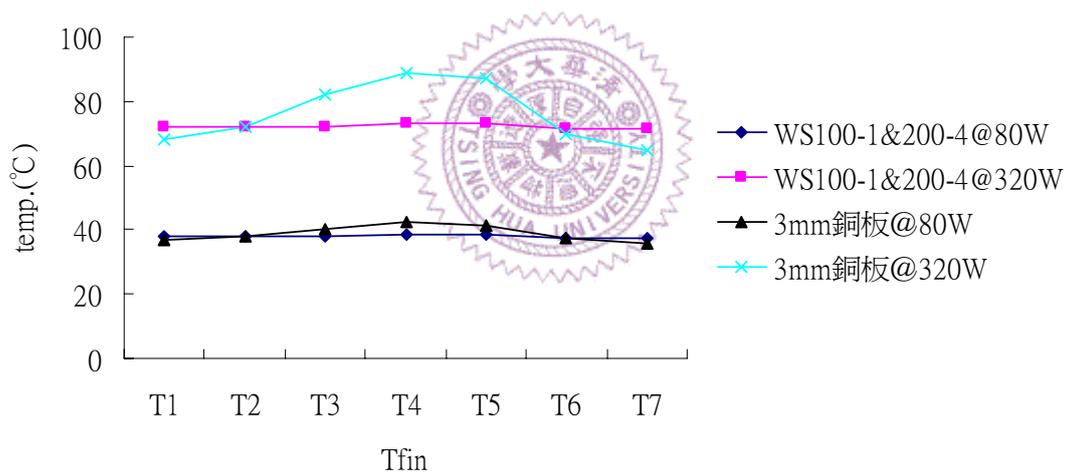


圖 4.10 輸入熱量為 80 及 320 瓦下，鰭片上各點溫度分佈(加熱面積 2cm x 2cm)

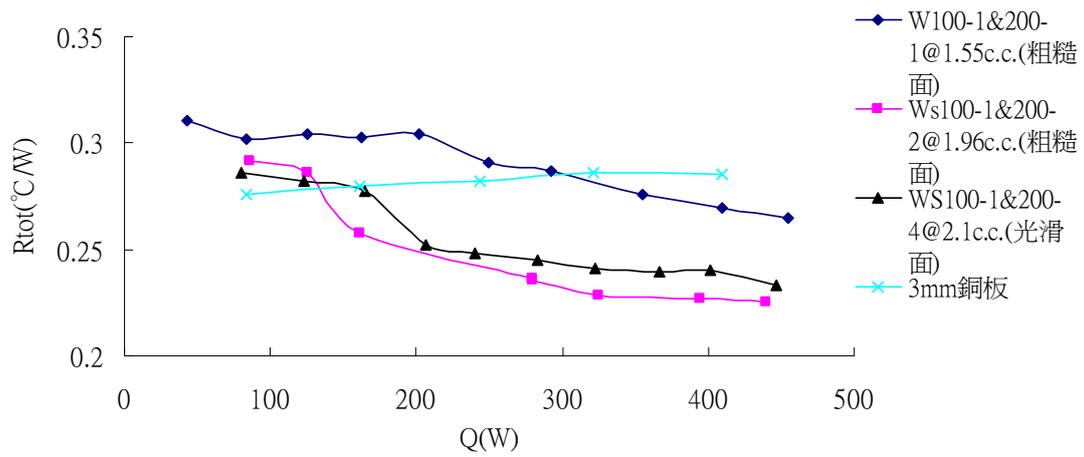


圖 4.11 不同種類毛細結構在較佳之參數下與 3mm 銅板之總熱阻與輸入熱量關係圖(加熱面積 2cm x 2cm)

