

第四章 實驗結果與討論

4.1 可視化實驗

由於本研究所拍攝的樣品具有高反光的表面，雖然圖像清晰但難以判別液汽介面確切的位置，所以在開始討論可視化的結果之前，先拍攝無加熱狀況下不同水量的圖像，作為加熱狀況下蒸發區中水位高低的參考。

4.1.1 圖像判別

本研究觀察區的位置均位於加熱源上方的蒸發區中，如圖 4.1 所示，觀察區位於蒸發區中央向偏冷凝區的方向(屬蒸發區之下端)。在無水的狀況下，兩層較粗的 100 目銅網毛細結構(2×100 毛細結構)與一層 100 目加兩層較細的 200 目銅網毛細結構(100+2×200 毛細結構)的影像分別如圖 4.2(a)與 4.2(b)所示：大部分的反光出現於銅網相交的隆起處(或稱節點)以及曲率較大的地方，如標記所示，且可以同時清楚的看見下層的銅網。對於 2×100 毛細結構而言還可以清楚的看到底板，反之，100+2×200 毛細結構共三層，不容易看見底板。圖 4.2(c)為 2×100 毛細結構的 50%水量(即下層銅網含水)，可以清楚看見，除了銅網本身的反光外，有液膜的地方會有額外的反光，如標記所示，大部分出現在節點附近；圖 4.2(d)為 100+2×200 毛細結構的 25%水量

(即只有最下層的銅網含水)，與圖 4.2(b)相比，可看見在標記處有額外的反光，這些反光皆是由液膜所造成的。

4.1.2 可視化之結果

有趣的是，對於本研究所實驗的 3 組毛細結構而言，在實驗的過程中皆無沸騰現象發生，其主要的原因可能為：本研究之毛細厚度較薄(0.4 mm)且經燒結，所以接觸熱阻小而降低底板壁面的過熱度，而導致沸騰不易發生。

圖 4.3 為兩層較粗的銅網毛細結構(2×100 毛細結構)的可視化結果。從低熱量至高熱量都無沸騰發生。20W 與 40W 之液汽介面位置並沒有明顯的改變，但由反光可知，上層網目間確實有液體存在，而節點已露出液面；在 60W 時，根據幾塊標記起來的強烈反光區判別，其液汽介面已經退到最上層銅網一半的位置，乃在銅網交錯處形成曲率較大的凹面而形成強烈的反光；在 80W 時，原出現在 60W 的強烈反光區則消失了，且此時可以較清楚的看見下層銅網，這表示原本存在 60W 最上層網目間的凹面在 80W 時已退到下層銅網。在 60W 時之所以無法清楚看見下層銅網是因為在上層網目間形成彎曲的液膜，導致下層的圖像被扭曲而不易看清；在 80W 時液汽介面已經退到下層銅網，其隆起的節點部份已經露出液面而可清楚看見。至於此

時液面的確切位置，則無法辨別。在 80W 時下層液膜凹面所形成的反光在 100W 時幾乎消失，此時觀察區內的液面甚低，甚至可能已經部份乾化，並無明顯的特徵來辨別液膜的位置。110W 的圖像類似於 100W。

圖 4.4 為一層較粗與兩層較細的銅網毛細結構(100+2×200 毛細結構)的可視化結果。從低熱量至高熱量都無沸騰發生。20W 與 40W 之圖像幾乎沒有差別，但亦可由反光可以得知，確實有相當多液體存在與上層網目間。在 60W 時，在標記處形成的扭曲複雜的影像顯示液汽介面下退使其曲率增加。在 80W 時可以明顯看到液汽介面已經退離最上層銅網，且在上兩層銅網之間形成許多因為液膜而導致的反光；在 100W 時，由於液汽介面繼續向下層銅網退後，已經無法區別液汽介面的位置。

圖 4.5 為四層較細的銅網毛細結構(4×200 毛細結構)的可視化結果。與之前兩種排列相同的熱傳機制，從低熱量至高熱量都無沸騰發生，皆是以薄膜蒸發為主要機制。20W 與 40W 之圖像幾乎沒有差別，液汽介面位於節點周圍的高度。60W 有明顯藉由液膜凹面在節點周圍所形成的反光，另外可以看見下層銅網被彎曲的現象，這是由於位在空隙上的液膜表面彎曲所造成視覺上的效果。80W 時，可以清楚的看見在空隙上藉由半月膜所形成的反光，這是由於液膜在向下退

導致凹面所形成的。100W 時，可以判別最上層網幾乎有一半以上已經裸露於液面之上，下層網可以看見部分裸露的節點，所以此時液汽介面位置大約是在上兩層之間。120W 可以看見下層銅網之節點已經完全裸露，此時液膜的確切位置以無法判別。140W 之圖像與 120W 類似。

4.2 蒸發熱阻與不同金屬網目之組合之關係

由於本研究中平板式熱管之底板為高導熱性無氧銅，實驗過程中發現有部分熱量會經底板傳至冷凝器，且比例隨不同加熱量而改變，因此本實驗中在底板埋置數個熱電偶以估計此底板熱損失率(PPHL, percentage of plate heat loss)，如圖 3.6 所示。實際蒸發熱阻則依據扣除底板熱損失後的真實加熱量來計算(詳見 3.5 節)。圖 4.6 與圖 4.7 分別顯示不同毛細結構之蒸發熱阻與底板熱損失率隨之加熱量(電源供應器加熱值)的關係。

圖 4.6 顯示 2×100 毛細結構之蒸發熱阻初始隨著輸入熱量上升而下降，最低值出現在 80W，為 0.09 /W；由於其孔隙度較大，以至於毛細力較不足，在高熱量(100W 與 110W)下運作無法提供足夠的液體導致有局部乾化的情況出現而使蒸發熱阻上升。圖 4.7 顯示底板熱損失率(PPHL)亦有與蒸發熱阻同步的趨勢，在低熱量(20W 與 40W)

運作時，由於蒸發區的液體量較多，使得熱傳效果較差且熱阻較大，導致藉由銅板傳導的熱量比例較高，其值約為 13.2%與 10%，當輸入熱量增加時，PPHL 隨之減少，顯示蒸發區的熱傳效果增強而減少了銅板傳導的熱量，PPHL 在 80W 時出現最低值 6.27%，此時亦為蒸發熱阻最小的熱量。之後由於蒸發區毛細力不足，無法補充足夠的液體，導致部分乾化而使蒸發熱阻變大，PPHL 亦急遽上升至 12.28%。

圖 4.8 為蒸發器上方之蒸汽溫度 T_2 與輸入熱量的趨勢圖。由此圖可以發現， T_2 隨著輸入熱量上升而上升，20W 至 60W 上升的趨勢幾乎呈線性，皆上升約 $0.4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ；在 60W 至 80W 上升的斜率則略顯平緩，上升 $0.33 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ，此時所對應的蒸發熱阻也最低；之後則由於蒸發區熱傳能力降低而導致 T_2 急遽上升。圖 4.9 為 2×100 毛細結構之熱管溫度分佈圖，在中低熱量時，各溫度點之差異及上升幅度較不明顯，但在高熱量(100W~110W)的情況下，可以明顯看出彼此之間之差異且溫度上升幅度有明顯增加的趨勢，這表示熱管的熱傳能力足漸下降中。

$100+2 \times 100$ 毛細結構之蒸發熱阻初始亦隨著輸入熱量上升而下降(圖 4.6)，最低值出現在 80W，為 $0.083 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ；由於其孔隙度較小，能夠提供較強的毛細力使熱負載範圍達到 160W。PPHL 亦有與蒸發熱阻相同的趨勢，最低值與最小蒸發熱阻亦同時出現於 80W，為

4.47%，如圖 4.7 所示。由圖 4.8 可以發現，T2 隨著輸入熱量上升而上升，20W 至 60W 上升的趨勢幾乎呈線性，皆上升約 $0.3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ；在 60W 至 80W 上升的斜率則略顯平緩，上升 $0.18 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ；之後則由於蒸發區熱傳能力降低而導致 T2 急遽上升。圖 4.10 為 $100+2\times 100$ 毛細結構之熱管溫度分佈圖，在中低熱量時，各溫度點之差異及上升幅度較不明顯，但在高熱量(100W~160W 以上)的情況下，可以看出彼此之間之溫差足漸增加且溫度上升幅度有明顯增加的趨勢，這表示熱管的熱傳能力足漸下降中。

4×200 毛細結構的趨勢大致與上述雷同，其蒸發熱阻最低值出現於 100W，為 $0.058 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ (圖 4.6)；PPHL 最佳值也出現於 100W，其值為 4.06%(圖 4.7)；T2 隨輸入熱量上升的趨勢也與其他兩種排列雷同。值得一提的是，在圖 4.8 中，T2 在 60W~100W 的溫升斜率較平緩，能夠形成較強的熱傳效果，原因將在下節討論。圖 4.11 為 4×200 毛細結構之熱管溫度分佈圖，在中低熱量時，各溫度點之差異及上升幅度較不明顯，且在 80W~100W 各溫度點上升幅度甚微，此時所對應的蒸發熱阻值也最低，直到 120W 才可較明顯的看出各溫度點上升幅度足漸增加，這表示熱管的熱傳能力足漸下降中。

4.3 平板熱管毛細蒸發區之熱傳機制

由圖 4.6 與圖 4.7 可得知，含有 200 網目的 $100+2\times 200$ 與 4×200 兩種毛細結構皆能夠延長平板熱管的運作範圍，可讓熱負載範圍達到 140W 左右；反之， 2×100 毛細結構只能夠達到 110W，這是由於毛細極限讓 2×100 毛細結構提早發生乾化現象而降低熱傳能力所致。

在低輸入熱量(20W 與 40W)運作下，由於液汽介面位元於最上層銅網節點周圍，液膜較厚且半月膜的曲率不足，導致薄膜蒸發率較低而有較大的蒸發熱阻，同時也增加了 PPHL。由圖 4.6 可以明顯看到 2×100 毛細結構的蒸發熱阻較大，而 $100+2\times 200$ 與 4×200 兩種毛細結構區別不出不同最上層銅網對蒸發熱阻所造成的差異。配合所有低熱量的圖像(圖 4.3~4.5)亦可發現，液汽介面的變動十分微小，所以在低熱量階段主要的熱傳機制應以熱對流-傳導為主[4]。

在中高熱量(60W~100W)時，由圖 4.3~4.5 可知，不論對哪一種網目排列而言，彎曲率較大的凹面漸漸形成，此時的熱傳能力也徐徐增加，且蒸發熱阻最低值發生時所對應液汽介面之位置皆位元於最上面兩層銅網之間。說明此現象可能發生的原因有二：(1) 4×200 毛細結構上兩層銅網的毛細力比其他排列組合來的好，增加了液體回流效率，所以存在相同輸入熱量下的液汽介面高度會高於其他兩者。(2) 由於觀察區之位置靠近蒸發區中心偏向冷凝區方向，相對蒸發區其他

位置而言，觀察區為一個迎水的區域，所以拍攝到的液汽介面會比蒸發區上端的介面來的高。雖然觀察到的液汽介面是位於上兩層網之間，但位在蒸發區上端的液汽介面會比觀察到的更低而有可能形成極薄的半月膜，增加了薄膜蒸發熱傳的能力而使蒸發熱阻降低。當液汽介面從蒸發區上端開始向下後退時，在上下兩層銅網之間的夾縫裡會形成許多垂直方向的半月膜，增加了薄膜蒸發熱傳的面積也強化了熱傳能力。

當液面退入金屬網毛細結構內部時，所能形成的總半月膜面積與蒸發率有密切關係。當網目較細密時，形成較小但較多的半月膜，其總面積較大。就目前三種排列組合其網目細密度的順序為：

$$4 \times 200 \text{ 毛細結構} > 100 + 2 \times 200 \text{ 毛細結構} > 2 \times 100 \text{ 毛細結構}$$

當液汽介面開始向下退時，網目細密度即影響蒸發熱傳的面積，這可能是 2×100 毛細結構的蒸發熱阻較大的原因(無法在兩層網目之間增加太多的半月膜而減少了蒸發熱傳的機會)。在 4×200 毛細結構中可形成較大的蒸發面積，所以不論在 60W 或 80W 下運作(此時液汽介面仍在最上層銅網一半的位置)，蒸發熱阻與 PPHL 皆可以達到與 $100 + 2 \times 200$ 毛細結構相同的低值。圖 4.12 為過熱度($T_1 - T_2$)與輸入熱量的關係圖，由此圖可以明顯看見 4×200 毛細結構能夠讓低過熱度的情況維持一段範圍(60W~100W)，且於 100W 時所得到的過熱度有些

微下降的趨勢，此時能夠產生較佳的熱傳係數，這樣的結果有兩種可能：(1)足夠的毛細作用使 4×200 毛細結構位於蒸發區上端的液汽介面能夠延後變薄，在達到最佳厚度之前皆是藉由較多的蒸發面積來維持過熱度；(2)100W 時，蒸發區上端的液膜可能達到最佳厚度而使薄膜蒸發熱傳效果上升，使得蒸發熱阻繼續下降。對於其他兩種排列組合而言，由於毛細力不足，無法使足夠的液體回流，導致沒有維持低過熱度的狀況出現。

在高輸入熱量(100W 以上)時，在多數的情形下，雖然無法從圖像裡辨別液汽介面的確切位置，但根據所得到的蒸發熱阻與 PPHL 足以判定是否有完全或部分乾化發生。就由 PPHL 可以得知(圖 4.7)，對於 $100+2 \times 200$ 與 4×200 毛細結構而言，從 120W 至 160W 之 PPHL 皆緩慢的上升，顯示已發生部分乾化，造成熱阻上升。對於 2×100 毛細結構而言，其毛細力最弱而最容易發生部分乾化，在 100W 時之 PPHL 已經上升至 12%。

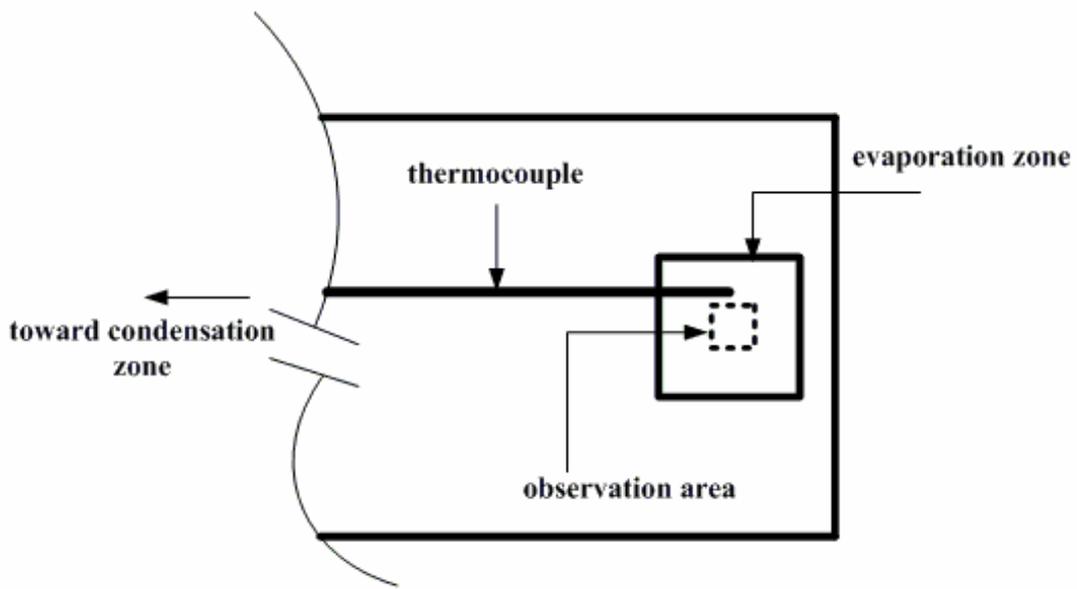


圖 4.1 可視化觀察區示意圖

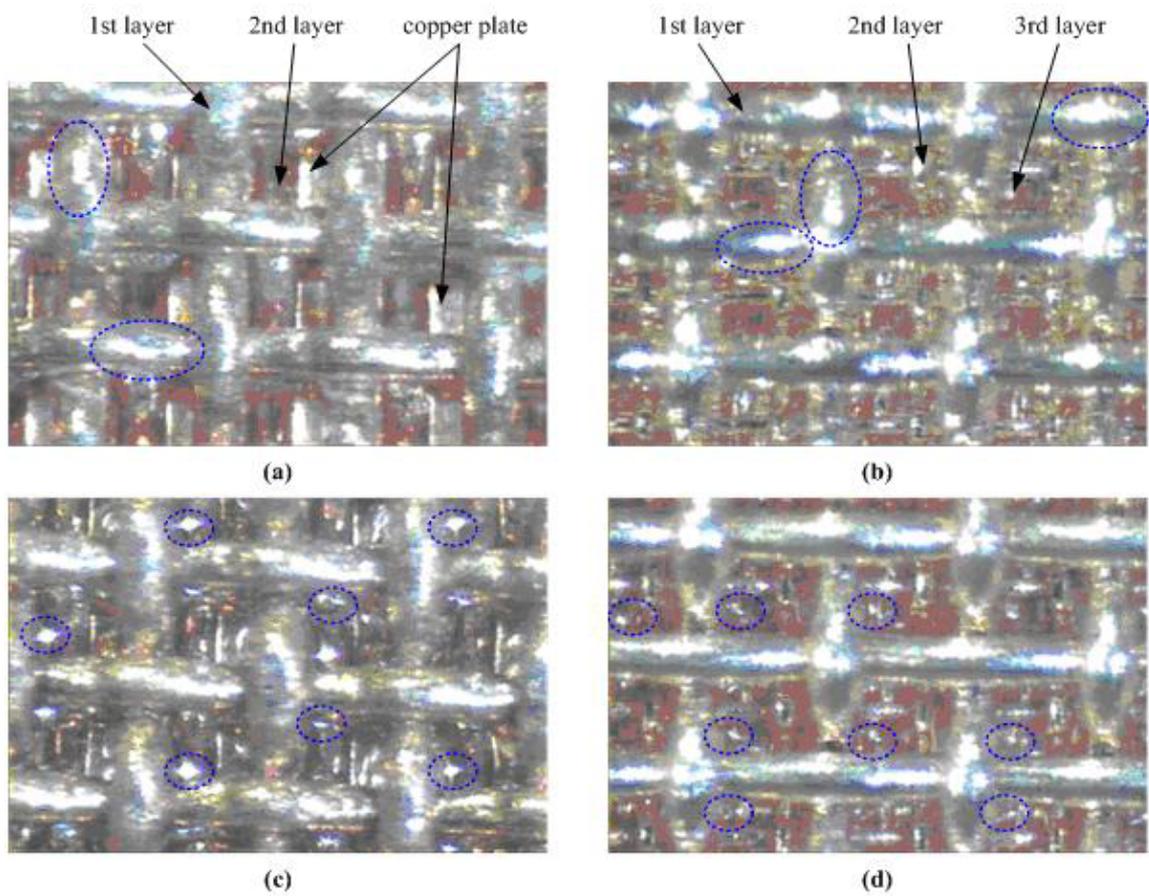
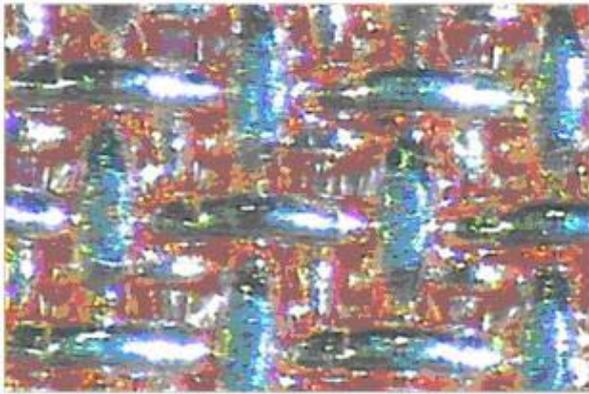
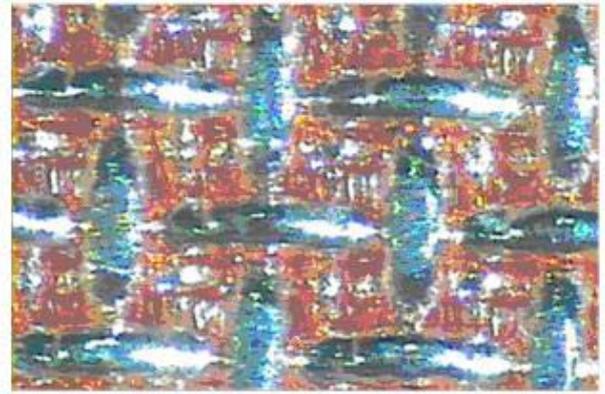


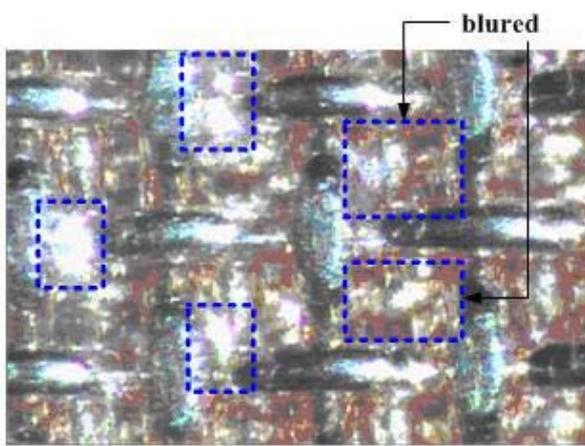
圖 4.2 不同網目無水與有水之差異圖



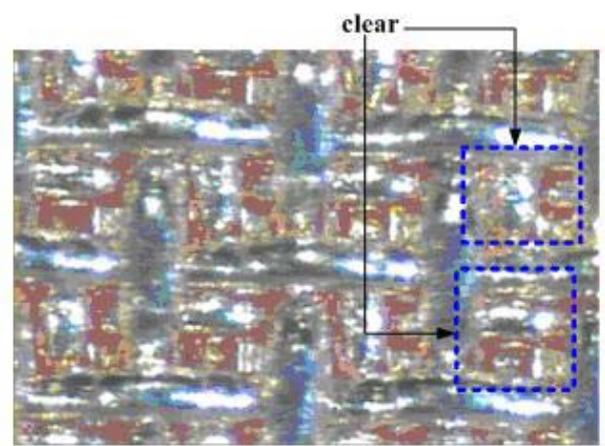
Q=20W



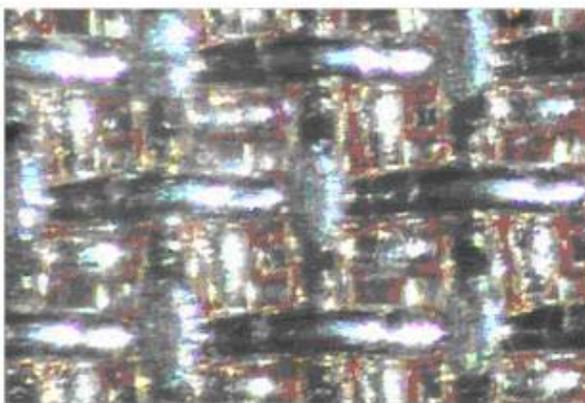
Q=40W



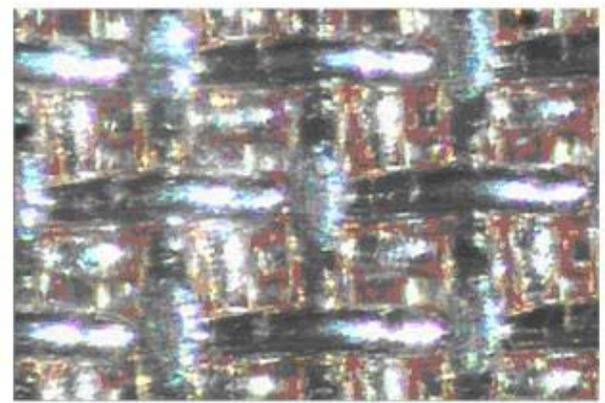
Q=60W



Q=80W

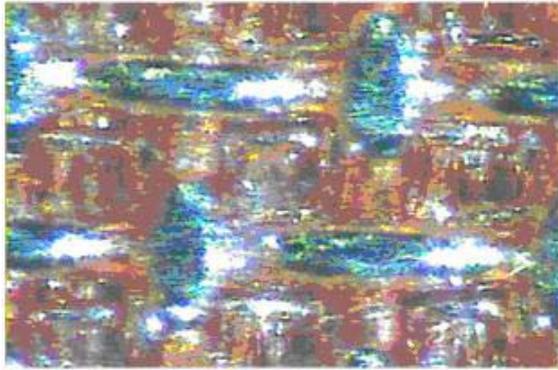


Q=100W

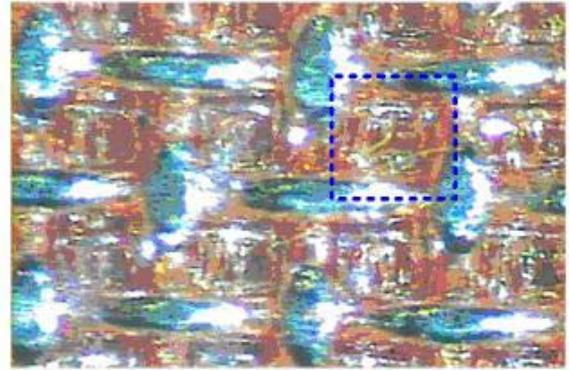


Q=110W

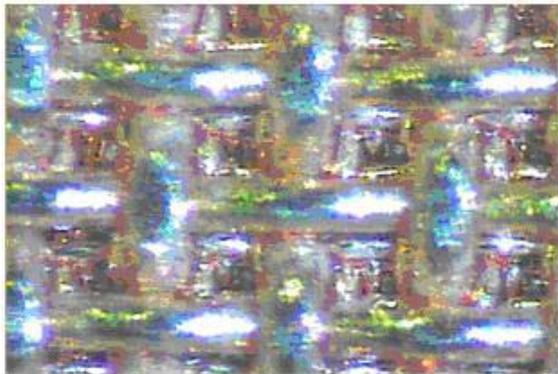
圖 4.3 2×100 毛細結構之可視化結果



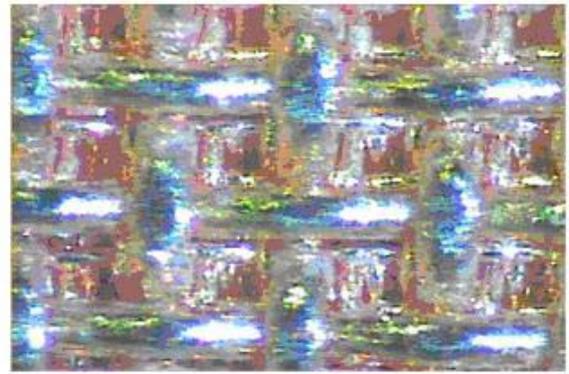
Q=40W



Q=60W



Q=80W



Q=100W

圖 4.4 100+2×200 毛細結構之可視化結果

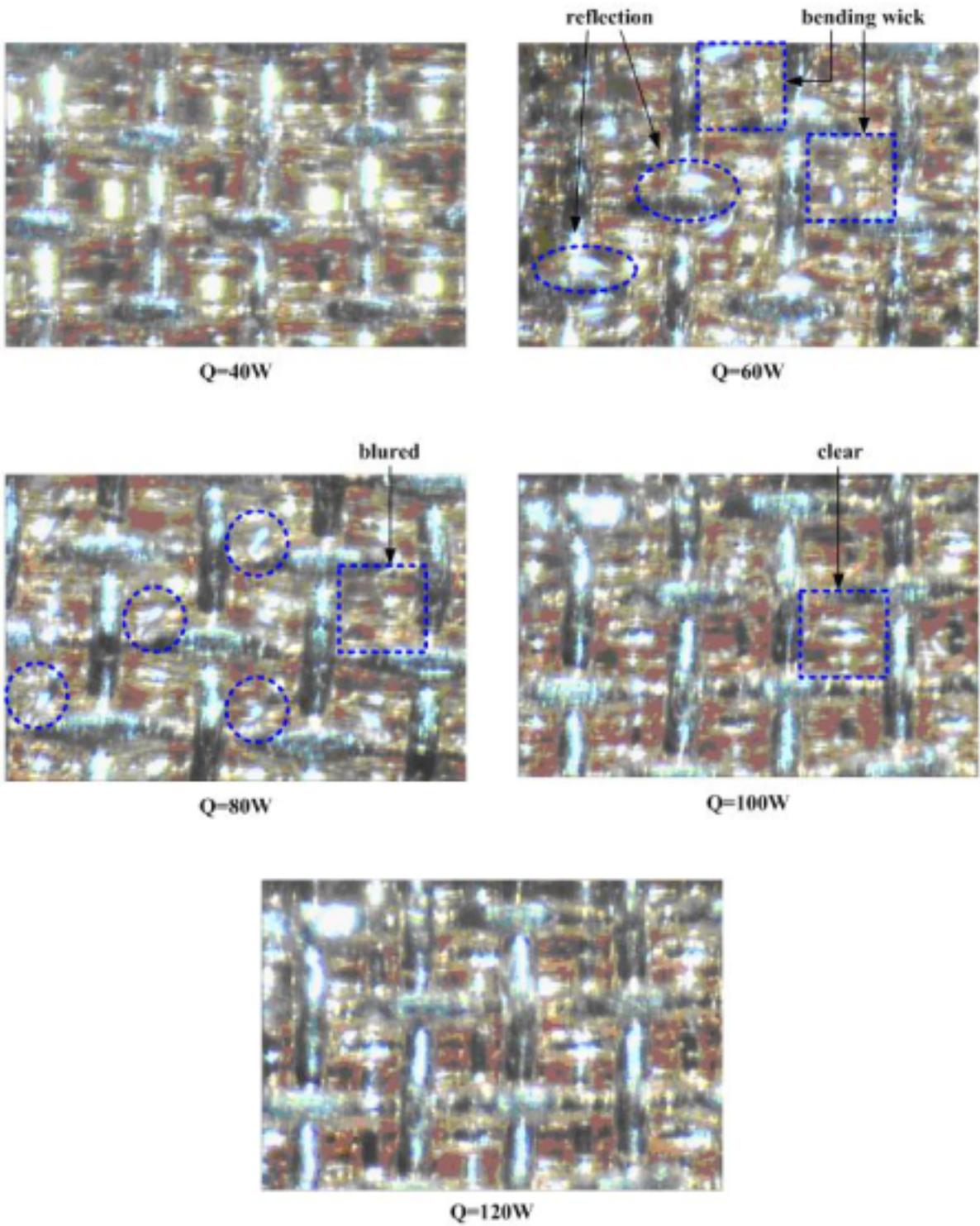


圖 4.5 4×200 毛細結構之可視化結果

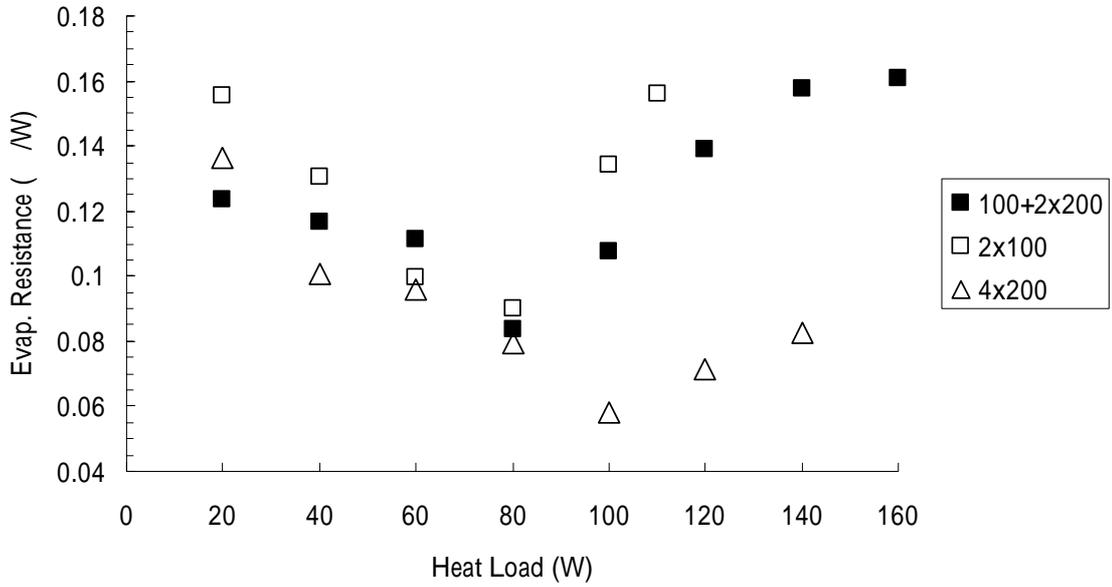


圖 4.6 蒸發熱阻與輸入瓦數之關係

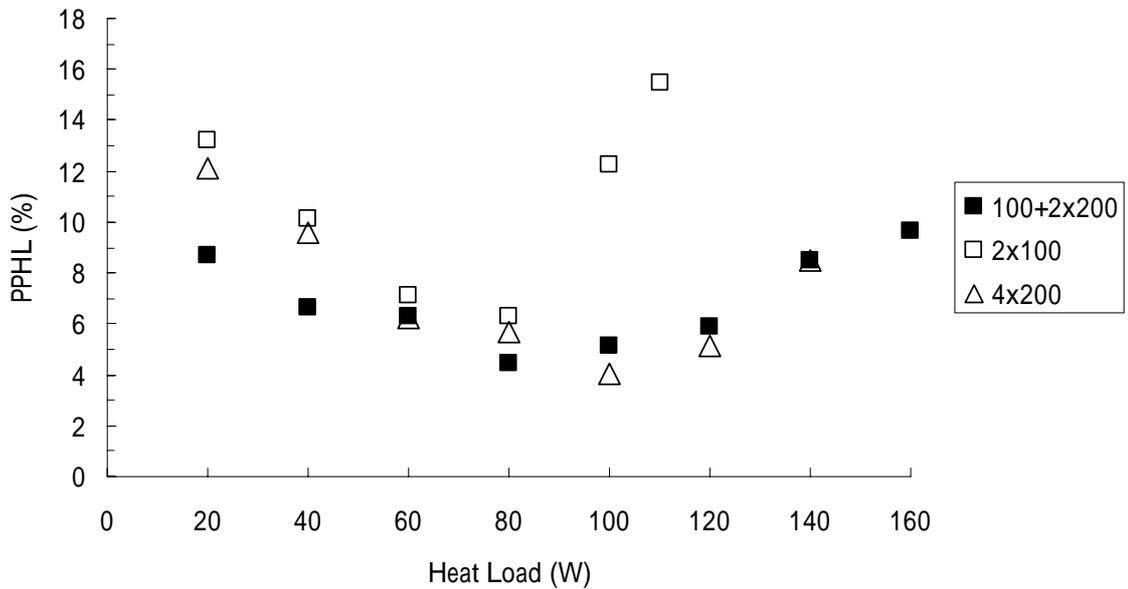


圖 4.7 底板熱損失率(PPHL)與輸入瓦數之關係

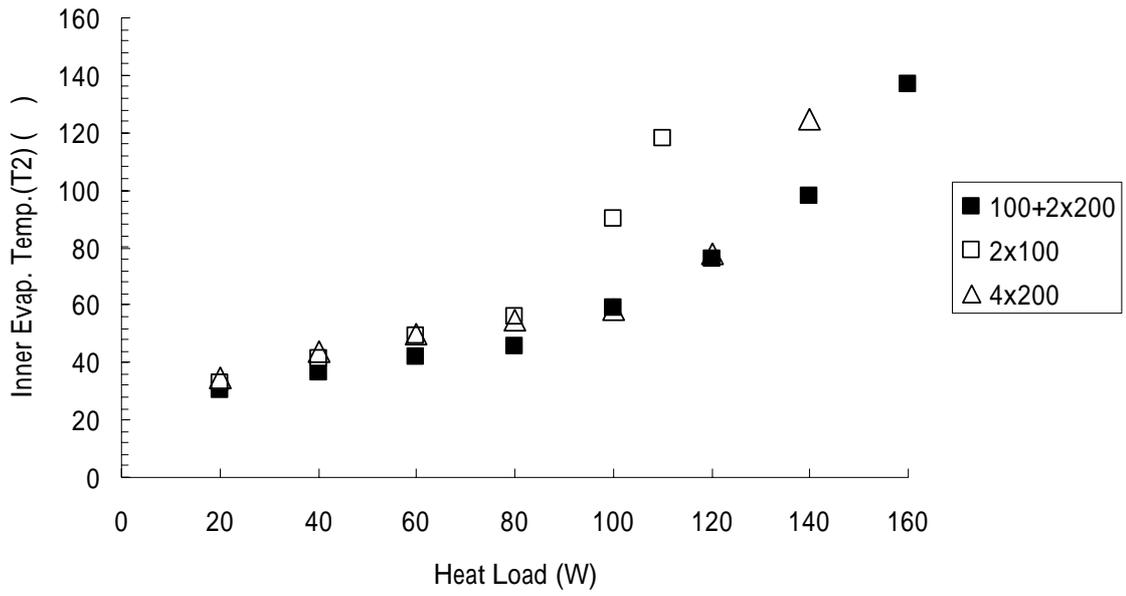


圖 4.8 蒸發區內部溫度(T2)與輸入瓦數之關係

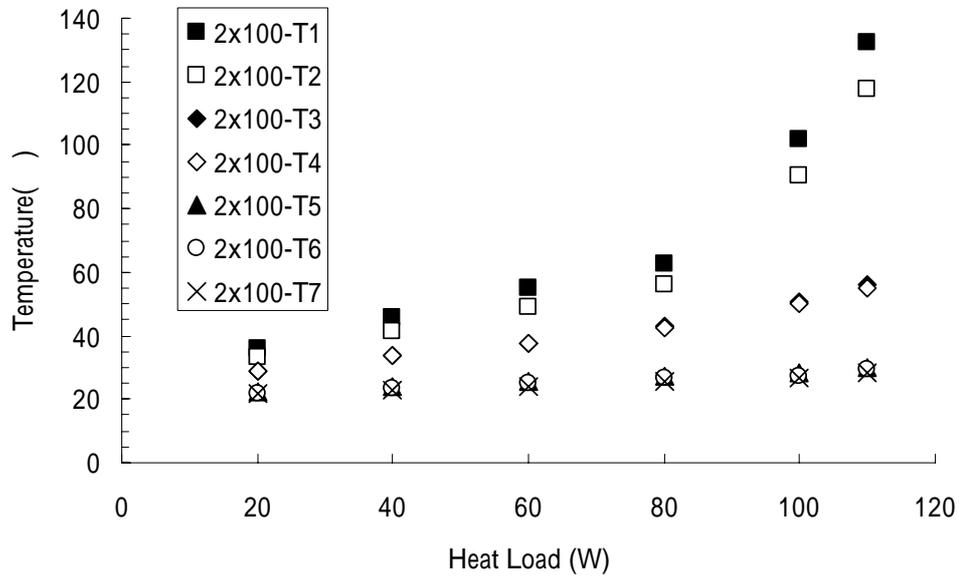


圖 4.9 2×100 毛細結構之熱管溫度分佈圖

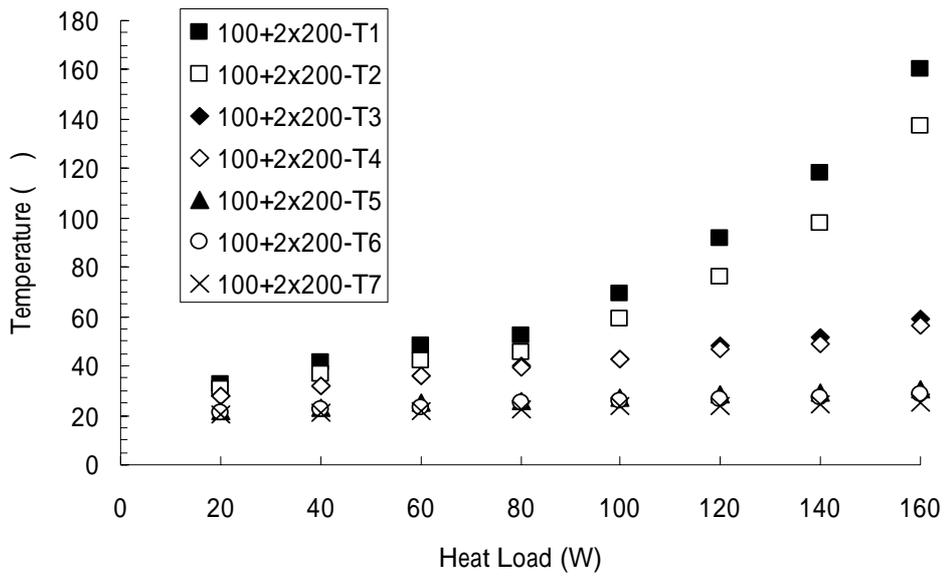


圖 4.10 100+2×200 毛細結構之熱管溫度分佈圖

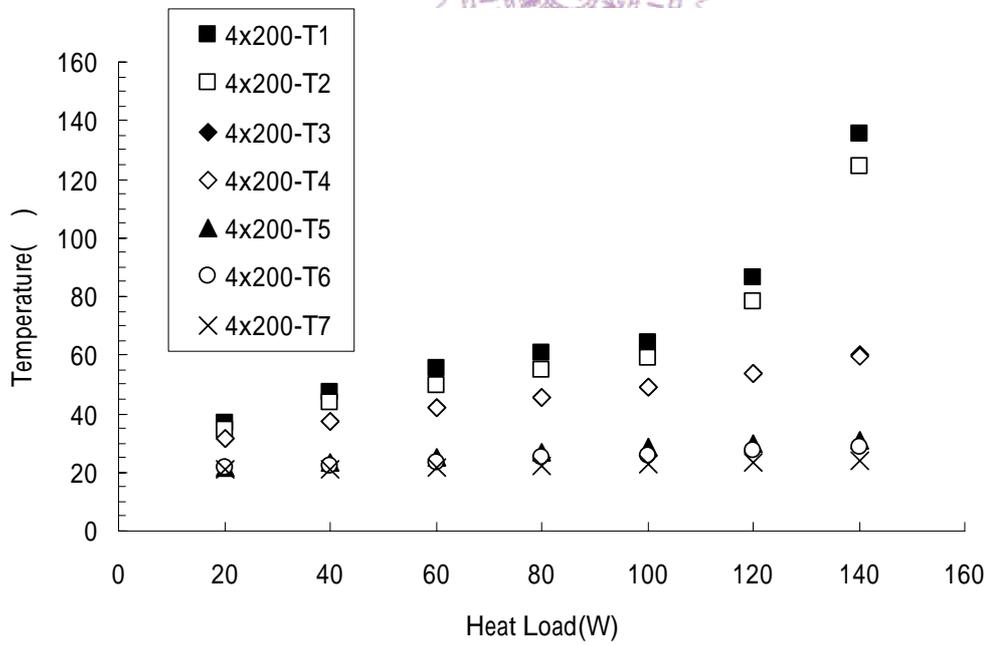


圖 4.11 4×200 毛細結構之熱管溫度分佈圖

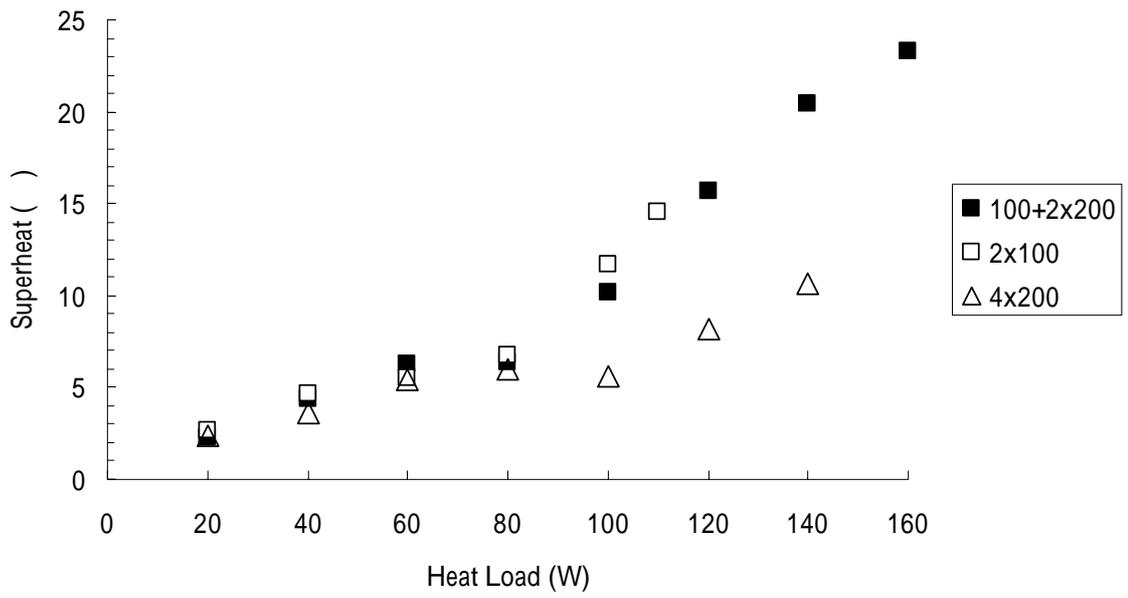


圖 4.12 過熱度(T1-T2)與輸入瓦數之關係

