

第三章 結果與討論

根據實驗結果，我們可以就以下幾項數據與圖形作為比對，來確認噴霧液滴直徑、液體體積流率、表面溫度及液滴速度……，對熱板散熱的效應。

3.1 預備實驗量測

3.1.1. 熱板表面溫度量測點的溫度差異：

熱板表面溫度共有三處量測點，分別是距中心距離 0、 $1/2 R$ 及 R ，如圖 2.4 所示。在未噴霧之前先進行一次加熱至 80°C 與 100°C 量測，皆發現三處的溫度差異僅在 1°C 左右。再進行噴霧冷卻，選擇小液滴($35\mu\text{m}$ ，如圖 3.1)、大液滴($350\mu\text{m}$ ，如圖 3.2)，進行不同溫度量測點的比較。圖 3.1 及 3.2 清楚顯示，埋設的三個點溫度曲線非常接近。只有在暫態至穩態這個階段內，中央點的位置因為錐形噴霧核心區液滴較密，造成中央冷卻速率較其餘二點快上些許。此外，由於噴霧液滴碰撞壁面實非連續性，故表面溫度呈跳動狀，尤其在大液滴時較為明顯。但是穩態後，其溫度與其餘兩點皆維持在相同溫度，故未來比較各參數對熱板的冷卻影響將以中心點為代表。

3.1.2. 氣相強制對流對熱板散熱的影響：

氣相強制對流散熱方面我們以純空氣進行，來判定噴霧中的空氣體積流率對散熱量所佔的比例，以分別看出氣、液相部分對總散熱量

的貢獻，在 80°C 、 100°C 及 120°C 發現並無太大差異。結果圖示於圖 3.3。在三個空氣體積流率分別為 2.5 L/min 、 5 L/min 、 8 L/min 時，可發現當空氣體積流率增加時空氣能帶走的熱量由 10 W 增加 13 W 。此處量測方式是對散熱表面先達到要求溫度後，並穩定 5 分鐘後，進行強制氣冷，再調高功率產生器，使散熱表面回升至要求溫度連續 5 分鐘不變，得到的功率，便是強制空氣對流所造成的冷卻效果。此部分氣相強制對流的散熱量在整體噴霧的總散熱量所佔的比例將在下文中討論。

3.1.3. 熱板系統損失熱量的量測：

考慮系統損失，量測在 80°C 、 100°C 及 120°C 在加熱板至絕熱棉與電木的溫度差，發現電木上下面溫度差距在 80°C 、 100°C 及 120°C 時，平均溫差分別為 15.3°C 、 16.2°C 及 18.1°C 。在量測電木上表面點採取多點量測發現差異不大，每點誤差均在 0.3°C 之內，若以近似一維的熱傳方式計算，得系統損失熱量分別為 0.12 W 、 0.13 W 及 0.15 W ，再考慮電木的多個表面，熱損失應大於上述數值，但熱損失預估亦在 1 W 以內，整體影響對實驗而言，並不顯著。

3.2 暫態冷卻實驗

3.2.1 液體體積流率對表面溫度變化的影響：

實驗中提供一個固定瓦數的熱源，使熱板表面溫度維持在 80°C 及 100°C 的狀態下，進行噴霧冷卻，來觀察在不同的液體體積流率下，表面溫度的暫態變化（圖 3.4~3.8）。其中發現在小液滴 $35\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ 時（圖 3.4~3.5），在相同的液滴直徑下，流量越大，熱傳效率就越佳，這是在液膜還未形成以前，因為可以汽化的液滴越多，能帶走的熱就越大。但在大液滴 $250\mu\text{m}$ 和 $350\mu\text{m}$ 時（圖 3.7~3.8），發現當體積流率增加時溫度變化曲線差異不大，且最後表面溫度，幾乎相同。根據觀察發現，當體積流率過大，液膜就會漸漸累積，熱傳效率變差，此時溫度下降的極慢。由於霧化器的振動頻率限制下，取得一組液滴直徑 $150\mu\text{m}$ 能涵蓋所有的體積流率範圍（如圖 3.6）。從圖 3.4~3.8 可以發現，當初始板溫為 80°C 時體積流率在 $29.7\mu\text{L}/\text{sec}$ 時在 D 為 $35\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$ 時，均有最佳的熱傳效率，亦即表面降溫最快且平衡溫度最低。

3.2.2 液滴直徑大小對表面溫度變化的影響：

由上述結果可知 $q_w = 29.7\mu\text{L}/\text{sec}$ 有較好的熱傳效率，因此進而利用此體積流率來探討不同液滴尺寸對熱板之冷卻狀況。從圖 3.9 ($T_o=80^{\circ}\text{C}$) 及圖 3.10 ($T_o=100^{\circ}\text{C}$) 發現，穩態發現溫度下降最好的是 $35\sim 75\mu\text{m}$ ，液滴直徑越大反而散熱越不佳，其原因應是因為大液滴體積較大，同液體體積流率數量較少，當液滴撞擊加熱平板後形成的液

膜覆蓋的有效面積較小，且個別液膜較厚，所以有效散熱面積較小，且熱從下表面傳到上表面所需的時間較長，使的蒸發率較慢，所以很容易造成上一顆液滴還未完全蒸發之前，下一顆液滴又覆蓋上來，使得液膜較易開始累積。而小液滴因為撞擊熱板後，形成的液膜覆蓋的有效面積較大，且膜厚較薄，散熱效果較佳較不易發生液膜累積的現象。由實驗中觀察發現，在相同的初始溫度下，大液滴液膜形成的時間比小液滴早很多，開始累積的溫度也比小液滴早十度到二十度，一旦液膜開始累積，降溫就變得很慢，但在小液滴（ $35\sim 75\mu\text{m}$ ）之間彼此的差異不甚明顯，此有待測定穩態熱通量來決定其中最佳的液滴尺寸。但由以上結果可以確認液滴直徑大小為噴霧關鍵重點之一。實驗圖示 3.9、3.10 顯示在 $q_w=29.7\mu\text{L}/\text{sec}$ 時，噴霧液滴直徑為 $75\mu\text{m}$ 時有最佳的冷卻效率，其最後的平衡溫度最低。然而有趣的是在圖 3.9（ $T_o=80^\circ\text{C}$ ）與圖 3.10（ $T_o=100^\circ\text{C}$ ），發現小液滴（ $35\sim 75\mu\text{m}$ ）在表面初始溫度 80°C 比表面初始溫度 100°C 降溫速率還快，其原因將在下節中作討論。

3.2.3 初始板溫對散熱之影響：

由圖 3.11~3.15 可以看出，在相同的液滴直徑、相同液體體積流率下，板溫越高，也就是加熱平板的熱通量越大，降溫曲線的斜率就越大，亦即熱傳越佳，這是因為板溫越高，單位時間所能蒸發的液滴

就越多，因此可帶走的熱量就越多，故散熱效率就越好，但熱通量越大，最終的平衡溫度就越高，這是因為當蒸發達到飽和時，熱板所產生的熱已經高於液滴蒸發所能帶走的熱量，此時已經到了臨界值，所以無法再讓板溫下降；另一個可能的原因為當溫度越高，液體的表面張力越小，所以液滴撞擊熱板所形成的液膜就越薄，亦即接觸面積越大，所以有利於液滴蒸發，由實驗數據發現不管熱板溫度高低，當液滴直徑越大則平衡溫度越高，此在 $D \geq 150 \mu\text{m}$ 較明顯。且在小液滴兩個初始溫度（ 80°C 、 100°C ）達到穩態時都降至 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ ，而大液滴（ $250 \sim 350 \mu\text{m}$ ），則穩態溫度隨液滴直徑明顯地上升比較大液滴與小液滴的穩態溫度差異範圍大約在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 之內。在 $150 \mu\text{m}$ 時，發現 80°C 、 100°C 的溫度下降曲線有交叉現象，形成原因將在下面討論中解釋。

上節描述在圖 3.9 ($T_o=80^\circ\text{C}$) 與圖 3.10 ($T_o=100^\circ\text{C}$)，發現小液滴（ $35 \sim 75 \mu\text{m}$ ）在表面初始溫度 80°C 比表面初始溫度 100°C 降溫速率還快，係因為表面初始溫度 80°C 時，液滴能較有效落在到散熱面上進行散熱，散熱速度較快。而 100°C 時，在噴霧冷卻散熱面時，其表面溫度較高，液滴容易發生在散熱面上方空氣先行汽化，而變成更小的液滴或完全汽化無液滴落在散熱面上影響降溫效率，而當散熱面降至較低溫時，其表面溫度對液滴的汽化不夠好時，容易造成液膜累

積，則散熱速度較緩慢。另外於液滴直徑 $75\mu\text{m}$ 時，在圖 3.10 中降溫曲線，在起始 50 秒與小液滴 ($35\sim 50\mu\text{m}$) 散熱情形相似，但在 100 秒過後，和中液滴 ($100\sim 150\mu\text{m}$) 散熱情形相似，此種具轉變性(transitional)行為，便與上面敘述的情形雷同。圖 3.13 在 $150\mu\text{m}$ 時，發現 80°C 、 100°C 的溫度下降曲線有交叉現象，其現象也是由上敘的原因所造成。

3.2.4 液膜累積對散熱之影響：

噴霧冷卻在熱板表面進行，當熱板表面溫度下降時，無法有效的蒸發汽化，便開始累積液膜，而液膜在剛形成之時，能有效的覆蓋於熱板表面達到均勻散熱，而液膜厚度較薄能達到的散熱效果更佳，而當熱板溫度再往下降溫便造成液膜無法汽化情形更為明顯，使得表面溫度無法繼續下降。在小液滴 ($35\sim 75\mu\text{m}$) 時，其形成液膜時間較長，且因液滴較小在熱板表面上能更均勻的分佈冷卻，所以在形成液膜時厚度也較薄，而在液膜形成初期也更能將熱帶走，當液膜厚度繼續增厚便會與大液滴狀況相同(圖 3.16 所示)，中大液滴 ($100\sim 350\mu\text{m}$) 則於形成液膜時間較快且剛形成液膜時，液膜厚度就比小液滴厚上許多，而最後累積厚度至過厚便形成溢流(圖 3.17 所示)。故小液滴能帶走的熱量將比中大液滴帶走更多的熱量。

3.3 穩態散熱實驗

3.3.1 不同液滴直徑與液體體積流率對散熱量的差異：

穩態散熱實驗乃利用電源提供功率，使熱板表面達到 80°C 、 100°C 、 120°C ，維持 5 分鐘不變後，進行不同液滴直徑，相同液體體積流率冷卻，在液膜未產生之前，調整加大電源功率，使散熱表面能夠不形成液膜且又保持在 80°C 、 100°C 與 120°C 的表面溫度，進而找出最大的散熱功率。如表 3.1 所示可以發現在小的液體體積流率 ($5.94\mu\text{l/s}$)達到的散熱功率在 $35\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ 時，均為 24.4W 。但是當液體體積流率增加至 $17.8\mu\text{l/s}$ ，可發現 $75\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ 已經產生液膜累積且向外溢流，而繼續調整功率上升，只會增加表面溫度到 60°C 左右就無法繼續向上升溫，所以 $75\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ 就無法顯示出真正散熱量為何，失去參考價值。此時增加一組 $60\mu\text{m}$ 嚴格將尺寸更細微化，來找出最佳化參數，發現 $60\mu\text{m}$ 並無液膜產生，故範圍鎖定在 $35\mu\text{m}\sim 60\mu\text{m}$ ，進行研究，結果發現其散熱量並沒有明顯增加，觀察發現在此液體質量流率下，調高的功率已經造成液滴在未碰觸到散熱表面，就已經蒸發完畢，故實際冷卻效率是空氣強制對流效應與散熱表面上方的液滴蒸發後的冷空氣下降至散熱表面造成的影響，並不能實際反應出所帶走的熱量，所以由表 3.1 可以明顯發現當液體質量流率再增加，依然無法有效提高冷卻效應，另外 $60\mu\text{m}$ 在液體質量流率 $41.6\mu\text{l/s}$ ，也發生液膜現象，確定 $35\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 為最佳，但液體質

量流率也不能超過 $41.6 \mu\text{l/s}$ ，否則也會造成液膜產生。另一方面利用能量守衡來計算理論散熱量與實際散熱量進行比較。根據以下能量守衡公式：

$$\dot{Q}_{\max} \cong \dot{Q}_a + \dot{Q}_w + \dot{Q}_{\text{SYS}} = \dot{Q}_a + \dot{m} * h_{fg} + \dot{Q}_{\text{loss}}$$

其中 \dot{Q}_{\max} 為理想散熱量(W)； \dot{Q}_a 為空氣體積流率散熱量(W)； \dot{Q}_w 為液體質量流率散熱量(W)； \dot{m} 為液體質量流率(kg/s)； h_{fg} 為液體溫度焓值； \dot{Q}_{loss} 為系統損失熱量，而 80°C 時 $h_{fg}=2308(\text{KJ/Kg})$ 、 100°C 時 $h_{fg}=2257(\text{KJ/Kg})$ 、 120°C 時 $h_{fg}=2540(\text{KJ/Kg})$ ，算出理論散熱量，如表 3.1 所示。如圖 3.18~3.19 在 80°C 、 100°C 時進行液滴直徑由 $35 \sim 150 \mu\text{m}$ 與各種質量流率下的實際散熱量與理論散熱量比較。在 80°C 、 100°C ，質量流率在 $5.9 \sim 29.7 \mu\text{l/s}$ 時實際散熱量差異不大，質量流率在 $41.6 \mu\text{l/s}$ ，其散熱量仍大約在 40W 左右，仍與理論散熱量差異甚大。根據 Murthy et al. [20] 發現在 superheat 時，有良好的散熱效果，Tilton [19] 則發現在 superheat $\leq 40^\circ\text{K}$ 時，平均液滴直徑在 $80 \mu\text{m}$ ，液滴速度 10m/s ，可以達到 $1000\text{W}/\text{cm}^2$ ，與本實驗相似，但其實驗採用壓力噴霧器產生，故其液滴速度較大。於是在液體質量流率在 $41.6 \mu\text{l/s}$ ，不發生液膜情況下，量測表面溫度在 120°C 時的散熱量，與 80°C 、 100°C 比較，但因 $75 \mu\text{m}$ 仍然有液膜產生，所以針對 $35 \sim 50 \mu\text{m}$ 進行量測，在圖 3.20 中發現在 120°C ，仍然與 80°C 、 100°C

一樣，在液滴未碰觸到散熱面上，就於散熱面上方被加熱空氣蒸發汽化，無法帶走大量的熱量。考慮增加氣體體積流率如下圖 3.21($q_a=5\text{L/min}$) 在 120°C 時，發現能帶走的熱量大幅提昇將近 50W ，且因液滴直徑大小所能帶走熱量，在此有較明顯差異，得知 $50\mu\text{m}$ 優於 $35\mu\text{m}$ 。圖 3.22 ($q_a=8\text{L/min}$) 在 120°C 時， $50\mu\text{m}$ 所帶走的實際熱量與理論散熱量幾乎完全相等，而更進一步實驗找出最大散熱量。發現當液體質量流率在 $53.8\mu\text{l}$ 時，液滴大小為 $50\mu\text{m}$ 有最大散熱量 150W 。本次實驗中，在液體質量流率不形成液膜的前提下，散熱效率最佳的液滴直徑、液體質量流率及最大散熱量便是上面實驗最終結果 (※由於機器使用限制於 $53.8\mu\text{l}$ 時， $35\mu\text{m}$ 無法產生對應振動頻率，故實驗只針對 $50\mu\text{m}$ 作實驗)。

3.3.2 液滴衝擊散熱表面速度對散熱量影響：

由上面敘述可得知，液滴根本還沒接觸到散熱表面，就已經在上方空氣蒸發完成了，由此可知衝擊速度對散熱表面，應該有一定性的影響。故取 3 個氣體體積流率分別為 2.5L/min 、 5L/min 、 8L/min ，進行噴霧冷卻實驗，為了維持錐角剛好於 2cm 的散熱面上，降低噴霧出口到散熱面的距離。另外，我們取液體體積流率 $41.6\mu\text{l/sec}$ ，不形成液膜為前提情況下，由表 3.2 可知道 3 個氣體體積流率的散熱量差別。在實驗觀察中，清楚的發現液滴確實有撞擊至散熱面上，而散

熱量也確實明顯增加。但仍然與理論散熱量有段差異，更進一步探討，在上節所敘述在熱板溫度高於液體沸點時，如圖 3.20~3.22 在不同液滴衝擊表面速度，配合熱板溫度高於液體沸點狀態下，有相輔相成的效果存在。由於量測速度的儀器無法修復，無法以衝擊速度表示，而以氣體體積流率為參考。

