

# 第一章 緒 論

## 1.1 前言

在現今的科技產業上，許多精密元件都面臨到散熱之瓶頸。在電子產業上，積體電路單位面積的電晶體數目不斷的增加；在精密機械產業上，製程精度不斷縮小；再加上近來極力發展的微機電及奈米技術，這些製程的進步，實現了元件不斷縮小化及精密化的可行性，不過也因此衍生出許多需要解決之問題，發熱元件之熱處理即為其中一項。

近年來，電子元件單位密度產生的熱通量幾乎是以指數型態成長。熱通量的大增也使得元件溫度居高不下，元件溫度過高可能會對整個系統造成嚴重傷害，降低系統的可靠度(如：接合失敗、晶片破壞、應力過大、電子遷移及離子擴散等)和性能(如：轉換速度改變及訊號衰減等)。因此，有效的冷卻方法的確需要極力發展及研究。

在電子裝備的冷卻應用上，大致上可分為氣冷式冷卻、液冷式冷卻及相變化冷卻。相變化冷卻可利用流體之顯熱(sensible)及潛熱(latent heat)來帶走大量熱。因此，利用物質相變化散熱方式遂成為研究主流。噴霧冷卻即屬於相變化冷卻的一種，其好處為當熱平衡時，可以使表面溫度接近汽化溫度(圖 1.1)，不會有局部高溫的現象，且其散熱量遠大於傳統散熱方式，因此極具有發展空間。

霧化的主要功用就是把液體微小化，以增加液體的表面積，進而增加反應速率，因此在很多方面有其應用的空間，如醫療中藥物的供給，燃燒室中燃料的提供，化學反應以及生醫檢測等都有加速反應速率的優點。以燃料提供為例，因為在液態燃料燃燒過程中油滴揮發過程所需的時間最長，因此在高動力需求時需藉著噴霧來加大油料與空氣的接觸面積，增加其揮發效率。此外，隨著生醫晶片的發展，噴柱液滴亦可應用於含有 DNA 溶液噴置於微生醫晶片上，其特點就是可以精確的施給非常微量的流體，不但可以減少檢體或試劑的用量，而且能加速其反應速率。

噴霧冷卻在電子設備的冷卻，例如：IBM公司將噴霧冷卻應用在 7 個MCM模組的晶片上(圖 1.2)。其冷卻原理與典型噴霧冷卻類似，工作流體經由噴嘴噴灑至發熱晶片，流體受熱沸騰後由Cooling cap之開口流出並冷凝形成循環。此模組的發熱功率為 300W，噴霧冷卻散熱效能  $45\text{W}/\text{cm}^2$ ，可將晶片溫度控制在  $75^\circ\text{C}$  以下。SprayCool™公司所研發之噴霧冷卻主要結構如(圖 1.3)所示，工作流體噴灑冷卻後，經由外界的熱交換器冷凝，然後在密閉空間裡形成循環。此系統的應用範圍甚廣，包含了電子模組冷卻、通訊系統冷卻及航空電子設備冷卻等(圖 1.4)。除了使用於電子設備外，也可在許多產業中應用。例如：汽電共生廠用噴嘴來冷卻鍋爐中的熱斑（在賓州的煤礦產區，汽電共

生廠燃燒草稈和無煙煤的廢棄物而在鍋爐中產生電。這些大鍋爐產生的高熱會導致耐熱鍋爐內襯的腐蝕。最後腐蝕終會影響耐熱材料的性能，熱經由鍋爐內襯傳到外側的鋼殼後，就會在鋼的表面產生「熱斑」。(圖 1.5a)、熱塑及熱固成形機台(圖 1.5b)、溫室冷卻及畜舍內降溫(圖 1.5c)、PVC管冷卻(圖 1.5d)等。

噴霧冷卻利用液滴相變化散熱之好處，讓我們有深入研究的動機，所以本研究藉由單佈性霧化器產生不同直徑的單佈性噴霧液滴，探討不同液滴大小、板溫、液體體積流率、空氣體積流率，液滴衝擊速度對冷卻行為的影響，試圖找出各參數之間與散熱量的關係。

## 1.2 液滴對熱板冷卻文獻回顧

噴霧液滴撞擊加熱平板的過程，會因為熱板的表面溫度高低不同而有所差異；當加熱平板的溫度極高時，使液滴在還沒有撞擊到加熱平板前，因熱傳旺盛的關係造成液滴下表面先行汽化，以致於在液滴與熱板之間會存在一層蒸汽薄膜，讓液滴無法撞擊到熱板表面，這就是所謂的 film boiling impact (圖 1.6)；若是加熱平板溫度維持在薄膜沸騰溫度與飽和溫度之間，則平板不會發生液滴累積的現象而維持乾燥的狀態 (dry-wall mode)；當加熱平板的溫度低於液體的飽和溫度時，因為熱板無法即時蒸發落於平板上的液滴，會使得液滴逐漸累積形成液膜覆蓋在加熱平板表面 (flooded mode)；原則上，液膜的累積

有助於液體與加熱平板的接觸面積增加，可增進兩者間的熱交換作用進而提昇冷卻效率，但液膜越厚，表面熱傳越差，可能降低冷卻效果。（如圖 1.7 所示）

液膜對於噴霧冷卻效能具有決定性的影響，從液膜厚度的觀點來看，大致上可分為三類，(a) 過度液膜膜厚：液滴過度累積使得表面形成一層厚厚的液膜，由於液體之熱傳導係數並不高，因此熱不易從下表面傳到上表面，散熱效果差；(b) 最佳膜厚：在適當的條件下，液膜以較薄的厚度均勻覆蓋整個表面，此時熱很容易從下表面傳到上表面，使得上下表面的溫度很接近，可同時產生汽化現象，熱傳效果最佳；(c) 過度汽化膜厚：由於蒸發旺盛及噴霧不均，使得有些區域已完全蒸發而無液膜覆蓋，有效的汽化面積較小，熱傳效率較差，甚至會發生熱點(hot spot)及乾化(dryout)現象(如圖 1.8 所示)。

文獻中關於液滴散熱行為的探討，大致可分為三大類：(1) 單一液滴，(2) 連續液滴，(3) 和噴霧液滴，且大多集中在發熱平面溫度高於液滴飽和溫度的範圍，以下分別加以說明。

#### ● 單一液滴

單一液滴噴霧冷卻的文獻主要集中在直徑較大（mm 等級）的液滴，少有小直徑（ $\mu\text{m}$  等級）相關研究。整個液滴汽化的過程主要可歸納為四大步驟：整個液滴汽化的過程主要可分為四個步驟（圖

1.9)：(1) 液滴撞擊熱板表面形成液膜，(2) 成核沸騰 (nucleate boiling)：因液膜下表面直接接觸到熱板急劇升溫，會先在液膜內部及液膜下表面產生沸騰氣泡，(3) 液膜沸騰 (film boiling)：當溫度慢慢傳導到液膜上表面時，會造成表面開始有沸騰的行為出現。(4) 液膜汽化 (film evaporation)：當熱量繼續增加，表面溫度越來越高時，整片液膜會開始汽化。大直徑液滴因為形成的薄膜較厚，熱量不易傳到上表面，所以會先在薄膜的下表面形成氣泡蒸發，而小液滴因為形成的薄膜較薄，因此上下表面溫度幾乎相同，所以可以增加汽化的速度，故熱傳效果較佳。

Humberto et al. [1] 發現，當液滴撞擊壁面後液膜會先行擴張，其擴張的程度會和表面溫度、Weber number ( $We = \rho u^2 / \sigma$ ) 以及摩擦力有關；基本上，液滴形成的薄膜會隨著表面溫度的升高而增大，這是因為溫度高，流體的黏滯力會下降，但液膜直徑到了一個最大值以後，會逐漸縮小，因為此時薄膜會開始碎裂成更小的液滴使得其直徑下降，而液膜的殘留時間 (residual time) 會和  $We$  及表面溫度有關， $We$  越大或表面溫度越高，液膜的殘留時間越短。

Chandra and Avedisian [2] 研究液滴表面張力的影響，他將表面活性劑加入純水中，產生具有不同表面張力的微小液滴，發現表面張力越小者，液滴與壁面的接觸角越小，使得蒸發時間縮短，冷卻效率

會隨著接觸角的變小而明顯增加。

### ● 連續液滴

連續液滴撞擊加熱平板的熱傳情形可分為三種形式：( a ) 蒸發冷卻 ( evaporation cooling )，加熱平板將所有撞擊上來的液滴都完全蒸發。( b ) 薄膜冷卻 ( film cooling )，當液滴撞擊的頻率太快時，液滴會在表面上堆積，因此，後來的液滴與平板之間的熱傳是隔著一層液體薄膜的情形下進行的。( c ) 乾燥面冷卻 ( dry wall cooling )，當表面溫度很高時，因為自然對流充分地旺盛，液滴在撞擊之後會被反彈回來，在整個撞擊過程中，液滴只被蒸發掉原來的 5% 到 15% 左右而已。

Pedersen [3] 研究液滴連續撞擊發熱表面的熱傳現象，結果發現加熱表面溫度極高 ( 1150°F 以上時 )，液滴的速度越快則熱傳效果越佳，他定義了散熱效率  $\varepsilon = Q_{\text{actual}} / Q_{\text{max}}$ ，當溫度在 150°C ~ 230°C 時， $\varepsilon = 90\%$ ，在 280°C 時， $\varepsilon = 20\%$ ，高於 300°C， $\varepsilon$  只有 18%。

Wang et al. [4] 在實驗中觀察發現，當液滴噴出後，會因為重力而加速，當接近熱板表面時，因為熱空氣向上對流的關係，會讓液滴減速，使得其終極速度會趨於定值；液滴的熱通量為：

$$q'' = \frac{\frac{1}{6} \pi d^3 \rho \times [L + C \times (T_b - T_s)]}{\int_0^{\tau} A dt}$$

其中  $L$  為液體的汽化熱， $C$  為液體比熱；而液滴的汽化時間和液滴的速度無關，和液滴的大小有關，這是因為液滴直徑越大，便需提供較多的能量讓它上升至沸點而汽化；當固定液滴的大小和速度時，發現表面溫度低時，液滴撞擊後的接觸面積大小幾乎和溫度無關，但當表面溫度逐漸升高以後，接觸面積會迅速的增加且遠大於低溫時，但溫度繼續上升，因為汽化現象越來越強烈，導致接觸面積無法繼續增加，所以最大接觸面積會有一峰值。

#### ● 噴霧液滴

關於噴霧液滴對熱板冷卻的研究相當多，有人就噴霧液滴速度、液體流率及液滴尺寸加以探討，有些人則探討外界環境：壓力、重力的影響，還有一些研究著重在熱板表面粗糙度、板面方向、板溫、噴霧方式、噴霧頻率的影響，以下分別加以說明。

Choi and Yao [5] 研究板面方向對噴霧冷卻的影響，發現在薄膜沸騰時，因為垂直撞擊的液滴在撞擊發熱表面彈跳之後仍會落回發熱表面，所以垂直撞擊的冷卻效果會優於相同條件下的水平撞擊。

Chen et al. [6] 研究指出，液滴速度與流率及尺寸對於噴霧冷卻的影響會隨系統而改變。在這些參數中，又以平均液滴速度對於臨界熱通量(CHF)及CHF狀態下的熱傳係數( $h_c$ )影響最大，當增加平均液滴速度時，CHF 與  $h_c$  會隨之增加；平均液滴流率對於CHF及  $h_c$  的影

響不如平均液滴速度顯著，但仍可觀察出平均液滴流率增加時，CHF 與  $h_c$  也會隨之增加。但在不同的平均液滴速度下，可能會造成平均液滴流率對於 CHF 及  $h_c$  影響的改變。此外，噴嘴直徑不同會形成不同尺寸之液滴，液滴直徑越小所形成的液膜越薄，熱傳效率也越佳。但噴嘴直徑對於 CHF 則無明顯影響。

Kitaru and Kenichi [7] 在戰鬥機上模擬重力對液滴冷卻行為的影響，發現在無重力狀態下，液滴撞擊壁面後會形成較厚而且面積較小的薄膜，使得無重力下的熱傳效果會較重力下來的差；在重力下液滴的分佈面積會比較大，因為重力的效應造成液膜向外拉伸，使外圍的熱傳不至於退化。但這是針對直徑較大的液滴而言，若直徑較小，重力的影響並不顯著。

Um et al. [8] 研究顯示，若噴霧液滴未均勻覆蓋加熱面，則在重力效應下，液膜會向外延伸且較薄，熱傳效果較佳。但若噴霧液滴已均勻覆蓋加熱面且空氣停滯場亦覆蓋整個加熱面，則重力對於熱傳性質及 CHF 無影響。此外，在液滴尺寸越小的情況下，重力之影響也就越不顯著。

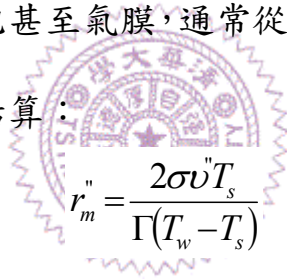
Anabel et al. [9] 研究壓力對冷卻行為的影響，發現壓力越低沸點越低，液體越快蒸發，熱傳效果越佳；另外，液滴溫度越低，雖然熱傳量較高，但熱傳效率（或熱傳係數  $h_c$ ）卻會降低，因為顯熱(sensible

heat)比潛熱 (latent heat) 低很多，越接近汽化溫度可較快帶走大量的熱，所以效率較佳；關於工作液體溫度越接近汽化溫度，可以得到較佳的熱傳效率。Kearns等人[10]也有相同的論點；不過另一種說法是：低溫會使得液體的表面張力增加，造成直徑較大但較少的液滴，使得熱傳變差。Oliphant et al. [11] 提出，當表面溫度低於液體之沸點時，則熱傳效果會和液滴速度有關，速度越快，熱傳效果會越佳；熱傳量和質量流率約成指數關係；此外，液滴的溫度越低，熱傳效率越差，可能和溫度低，表面張力較大，使得液滴撞擊壁面後，薄膜厚度較大，所以會有較差的熱傳效果。

Qiao and Chandra [12] 得到水噴霧冷卻表面熱通量，可在  $100^{\circ}\text{C}$   $\sim 140^{\circ}\text{C}$  的溫度範圍內提升三倍的結論。Chandra et al. [13] 提到在加熱平板溫度一直增加超過沸點時，液滴和熱板接觸面間的氣泡會增加，當溫度繼續升高，液滴碰觸到熱板的接觸面積會越來越小，這是因為液滴打到熱板前會先行蒸發，使得液滴形成一層汽膜，會減少液滴與熱板之間的熱傳量，這種狀況在薄膜沸騰時會有最明顯的效果出現，作者亦發現在停滯區 (stagnation zone) 熱傳效果最佳，越遠離停滯區熱傳越差。

Sehmbey et al. [14] 針對三種不同材質的發熱平面進行噴霧冷卻實驗，實驗溫度在  $60^{\circ}\text{C}$  到  $120^{\circ}\text{C}$  之間，結果發現在表面溫度高於  $100$

°C 時，液滴的接觸角越大則表面熱通量越高，而且也發現如果平板表面具有較小的粗糙度時，會有較為優異的冷卻效果。Pais et al. [15] 針對三種不同粗糙度的發熱表面進行噴霧冷卻實驗，亦獲得粗糙度越小者，冷卻效果越佳的結果；另外，薄膜越薄，熱越容易傳到表面，加速表面的蒸發，帶走大量的潛熱。Benjamin and Balakrishnan [16] 提出，液滴的汽化行為和熱板表面粗糙度、流體黏滯性以及液滴與表面的接觸角(contact angle)有關。表面粗糙度越小雖可增加成核沸騰時的成核址(nucleation site)，但若兩相鄰成核址過於接近，則形成之氣泡將相互結合而形成大氣泡甚至氣膜，通常從孔穴(cavity)成長之氣泡的半徑可以下列經驗式來估算：


$$r_m'' = \frac{2\sigma v'' T_s}{\Gamma(T_w - T_s)}$$

其中， $\Gamma$  為液體汽化潛熱， $\sigma$  為液體表面張力， $v''$  為氣相比容，

$T_s$  為液體飽和溫度， $T_w$  為壁溫。

由於蒸氣之熱傳導係數遠小於液體，氣膜之產生將造成熱傳效率大降。由此可知，表面粗糙度也存在一最佳值。另外，保持一定的薄膜厚度是必須的，因為如此可以增加散熱面積，但又不宜太厚，會增加蒸發時間，當空氣流速增加時，會導致較小的液滴及較高的速度，使得液膜變薄，造成較佳的熱傳效果。

Estes and Mudawar [17] 在實驗中發現，當噴霧頻率過高時，

會在熱板表面形成一層水膜，影響液滴的汽化效率；而汽化效率和We成反比關係，當 $We < 10^{-5}$ 時，汽化效率接近 100% ，當 $We > 0.1$  時，其汽化效率不到 10% (如圖 1.10 所示)，在噴霧冷卻的過程中，除了液滴撞擊壁面碎裂蒸發之外，也有可能因為板溫過高，使得液滴在為接觸到壁面前已先行蒸發；液體流量的影響力大於液滴速度，會造成液膜厚度的不同，影響液滴的蒸發行為，大抵而言，液滴速度只會影響局部的熱傳，總體來說還是由流量決定。

Huddle et al. [18] 比較噴霧冷卻與單相微熱管冷卻之間的差異，發現噴霧冷卻的好處為可使板溫維持在一個均勻的溫度，這是因為在熱平衡時，液體的汽化溫度會保持不變，所以可以維持恆溫，但微熱管卻無法做到這點，因為它的溫度分佈會隨著液體的位置而變，因為液體隨著流動方向不斷的吸收熱量，造成溫度持續升高。(圖 1.11)

Tilton [19]利用壓力式噴嘴產生水噴霧作冷卻，發現表面溫度在 $superheat \leq 40^{\circ}k$ 時，液滴平均直徑為  $80 \mu m$ ，液滴衝擊表面速度  $10 m/s$ ，散熱通量能至  $1000 W/cm^2$ 。但壓力式噴嘴的噴霧為多怖性，包含許多不同直徑液滴的整合效應，尚不能提供液滴最佳尺寸的參考。

Murthy et al. [20] 研究描述 EDIFICE ( Embedded Droplet Impingement For Integrated Cooling of Electronics )的發展，利用chip背

面的表面結構與產生 50~100  $\mu\text{m}$  噴嘴的出口形狀的改變來增進散佈(spreading)及沸騰(boiling)，並且利用微製程技術來製造chip背面結構層，將其整合在電子封裝之中(圖 1.12~1.14)，再利用數值模擬模型來研究系統或元件層級的初步設計，冷卻液體採用冷媒FC-72，在表面過熱溫度(surface superheat)達到 120°C 時，其最大熱通量達到 31 W/cm<sup>2</sup>。

李逸才 [29]利用霧化器產生單佈性噴霧，量測熱板上依固定點溫度隨時間變化情形，在固定噴霧錐角，改變液滴直徑、液滴流量、初始板溫及表面粗糙度，觀察降溫曲線、平均液滴尺寸變化和其他參數對噴霧冷卻的影響，其實驗配置圖示於圖 1.15。結果發現小液滴和大液滴散熱能力有明顯差異，平均液滴直徑越小，溫度下降越快，液膜累積越慢；表面粗糙度越小，熱傳效果越好；液滴流量越大，散熱效果越佳，但存在一臨界流量值，超過或低於此值，都不是最佳效果；初始板溫越高，溫度下降越快，但文獻中的量測點無法快速反應熱板降溫情形，是仍須加以改進的。

### 1.3 研究目的

關於液滴噴霧冷卻相關的文獻甚多，但大部分的噴霧液滴直徑從幾 mm 到數百  $\mu\text{m}$  [1, 2, 3, 7]，對於 100  $\mu\text{m}$  或更小尺寸的液滴直徑研究較少 [19, 20]，從上面文獻中可以知道液滴直徑較小時，熱傳效果較

佳，所以本實驗利用霧化器產生平均液滴直徑在  $35\mu\text{m}$  到  $350\mu\text{m}$  單佈性噴霧範圍進行研究，雖然李逸才[29]的研究發現平均液滴直徑小於  $100\mu\text{m}$  的噴霧冷卻效果遠優於  $375\mu\text{m}$ ，但其僅記錄噴霧冷卻熱板面過程中之暫態改變，並未量測板面的熱通量，且熱板面的設計與溫度量測點位置設在噴霧與熱板接觸區域之外的熱板上，不足以迅速反映出板溫的變化。此外其噴霧液滴平均直徑為  $25\mu\text{m}$ 、 $35\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ 、 $375\mu\text{m}$ ，前三者較小值的散熱效果彼此間差異不大，而後三者的效果差異甚大，顯然需要將  $35\mu\text{m}$ ~ $375\mu\text{m}$  之間的平均液滴直徑作更詳細。以找出具較佳冷卻效果的直徑範圍。

本研究將改進加熱系統與溫度量測的缺點，以獲得暫態與穩態熱傳的定量數據，主要的目的是試圖從實驗結果歸納出初始板溫、液滴直徑、液體質量流率、液滴衝擊熱板表面速度與散熱能力的關係，其中尤其著重液滴大小對於冷卻的效應。