

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

調控陣列噴霧冷卻實驗探討

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-046-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：翁宗賢

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 1 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

調控陣列噴霧冷卻實驗探討

Investigation of Mist Cooling with Versatile Micro Jet Array

計畫編號: NSC 92-2212-E-002-046

執行期限: 92/8/1~93/7/31

主持人: 翁宗賢 臺灣大學應用力學研究所副教授

一、摘要(中文)

關鍵詞: 霧粒冷卻、流場顯影、噴流霧化、蒸發冷卻、精微流力

本文利用熱氣泡噴墨印頭結合 FPGA (Field Programmable Gate Array) 晶片產生調控式陣列精微噴霧, 以低速風洞產生強制空氣流場, 分別以定頻及變頻兩種噴霧方式對加熱平板進行噴霧冷卻實驗, 並藉由資料擷取控制系統紀錄平板之瞬時溫度變化, 進而推算出對流熱傳係數。

定頻噴霧冷卻是將霧滴以固定之頻率噴射至發熱平板, 藉以觀察噴霧冷卻前、後熱傳對流係數之變化, 結果顯示噴霧後可提高對流熱傳係數 1.2 至 2.9 倍。變頻噴霧冷卻是判斷資料擷取控制系統量測之平板溫度後, 送出相應之變頻控制訊號, 而隨著平板溫度變化產生變頻噴射霧滴, 結果顯示噴霧後可提高對流熱傳係數 1.9 至 2.3 倍。

(英文) (Keyword: mist cooling, flow visualization, droplet formation, vaporization, micro fluid mechanics)

Mist cooling of two heated areas was studied under natural and forced convection. Array of water droplets was generated by a thermal bubble jet printer head. Transient temperatures were recorded by a data acquisition system to deduce heat transfer coefficients. Water droplets discharged vertically at various heights in natural convection. Results indicate that mist cooling can en-

hance heat transfer rate 1.4 to 6.8 times over pure natural convection. Forced convection was tested in a low-speed, mini wind tunnel. Mist cooling increases heat transfer coefficient by 1.28 to 11.7 times.

二、計畫緣由與目的

隨著半導體製程技術日益精進, 使得單位面積的矽晶圓上, 常配置數百萬, 甚至數千萬個電晶體, 造成積體電路的運算能力大幅提昇, 但是, 密集的邏輯閘在高頻運作時常伴隨嚴重的散熱問題, 若不能有效的將熱能帶走, 不僅影響電路的可靠度, 嚴重時甚至會大幅縮短使用壽命。

在多種散熱方法中, 使用液體蒸發吸收大量潛熱的噴霧冷卻是一項非常有效的技術。相關的文獻中, 對於小面積噴霧冷卻的研究可追溯至 1970 年, Pedersen 發現在高溫表面的液滴撞擊速度愈快, 則熱傳效率愈高。Choi & Yao (1987) 指出在薄膜沸騰時, 垂直撞擊的冷卻效果會優於水平撞擊。Sehmbey et al. (1992) 探討表面粗糙度及液滴接觸角度對熱傳的影響。Qiao & Chandra (1998) 以噴霧冷卻提升三倍表面熱通量。Tartarini 等人(1999)量測單顆和多顆液滴的蒸發速率與平板表面溫度。Ma & Tian (1990) 探討發熱平板與噴嘴間的距離對熱傳係數的影響。Webb et al. (1992) 比較表面為液膜、轉換期和乾燥三種狀態的熱通量。Heffington et al. (2000) 指出霧滴

粒徑範圍在 70~400 μm 的熱傳效果最佳。針對小散熱量設備，翁&康(2000)改裝熱汽泡噴墨頭噴射水霧，以自然對流冷卻加熱平板，量測表面熱通量及熱對流增強效應。王(2001)等人研究不同液滴之撞擊速度與發熱平板表面溫度之撞擊現象，以撞擊動力學之角度提出有別於其他文獻之液滴撞擊分類法。

三、研究方法

本實驗將 HP51626A 熱氣泡噴墨印頭清洗後充填去離子水，以 FPGA 晶片驅動微噴嘴，產生直徑約 50 μm 的霧粒，進而冷卻發熱平板。數位電路可精準控制噴墨動作時間和加熱時脈寬度至 1 μs 。八個噴墨孔依序產生噴霧，每孔噴出時間和前孔有八分之一個噴霧週期之延遲。定頻與變頻噴霧皆在小型開放式風洞內測試，其中變頻噴霧之噴霧頻率與平板表面溫差設定為線性之變化。發熱平板的溫度設定在介於室溫與水的沸點範圍內，量測發熱平板的溫度變化歷程，以推測增加之冷卻效應。

其中，低速風洞試驗段的內部截面積為 2 cm $\times$ 2 cm，長 20 cm，低速氣流由壓縮空氣供應，經多層濾網和整流區後進入測試段。發熱平板電阻值為 26 Ω ，暴露面積 1.6 cm^2 ，由可程式化電源供應器提供加熱所需之直流電壓，將發熱平板之溫度以下述方式調控：噴霧冷卻實驗是以個人電腦控制噴霧觸發訊號，再由 FPGA 調控八組加熱脈衝電路及噴霧時序。發熱平板的輸入電壓與各熱電偶的溫度量測則以數位資料擷取卡讀取，並在個人電腦中判斷是否需要對可程式化電源供應器送出控制訊號對發熱平板加熱，進而將發熱平板與室溫之溫差調控在 35 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 之間。

四、結論與討論

為分析噴霧冷卻時所增加之熱傳量，需將電源供應器輸入至發熱平板的總加熱功率，依熱傳路徑分成傳導至絕熱保麗龍所耗散的熱損失量和經由發熱平板對流至空氣的熱量。在噴霧冷卻時，後者則包括噴霧冷卻時液滴的蒸發熱。首先建立在穩定狀態下，發熱平板表面與環境溫度間之溫差 ΔT 與加熱功率間之關係式，實驗顯示溫差與加熱功率為線性關係。接著評估傳導至絕熱保麗龍的熱損失量，評估方法是將發熱平板裸露在風洞測試段部份以保麗龍密封後，對發熱平板輸入設定之加熱功率，並記錄在穩定狀態下的輸入功率與平板溫度變化量，則可由面積比例關係算出平板溫度與傳導至絕熱保麗龍的熱損失量之關係。

在本實驗中，使用個人電腦透過 RS-232C 傳輸介面控制可程式化電源供應器，建立起一套發熱平板調控機制，將平板與環境溫度之溫差 ΔT 控制在 35 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 之間，調控的原理是在個人電腦中判斷目前之溫差 ΔT ，若 ΔT 低於 35 $^{\circ}\text{C}$ 時，立刻送出訊號啟動可程式化電源供應器對發熱平板進行加熱；反之若 ΔT 高於 60 $^{\circ}\text{C}$ 時，便關閉可程式化電源供應器，停止對發熱平板加熱，如此便可將 ΔT 調控在 35 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 之間。

圖一是典型的調控式加熱冷卻曲線，在未執行噴霧冷卻時，當 ΔT 升高至 60 $^{\circ}\text{C}$ 時，調控機制開始產生作用，停止對發熱平板加熱，使得發熱平板之溫度不再持續上升；停止加熱之平板在對流空氣的作用下開始冷卻加熱平板，使得平板溫度隨著時間之增加而逐漸的降低；當 ΔT 低於 35 $^{\circ}\text{C}$ 時，調控機制再次產生作用，開始對發熱平板加熱，使得 ΔT 再度增加。所以在調控機制的作用下，將使得平板之溫度在調控之溫度範圍中反覆升溫及降溫，由上述說明可以清楚的瞭解，在調控機制的

作用下，將使得發熱平板的溫差與加熱功率產生週期性之變化，因此為了方便後續數據整理及分析，故將一循環週期中發熱平板之溫差積分後取平均值，而得到發熱平板之平均溫差 ΔT_m ，至於圖二中平均加熱功率之處理方式是將加熱功率與工作週期 (duty cycle) 相乘後得到平均加熱功率 Q_m 。

本文將定頻噴霧實驗所得之結果整理出平均紐賽爾數 (Nusselt number) $Nu_{m,predicted}$ 、噴霧頻率 f 、加熱功率 Q_p 及雷諾數 (Reynolds number) 等參數間之經驗公式：

$$Nu_{m,predicted} = (12.5314 + 0.0259f) \times Re^{0.0044Q_p + 0.1222}$$

將雷諾數、加熱功率與噴霧頻率代入上式的經驗公式可得到紐賽爾數預測值，與實驗值之最大誤差皆小於 10%，且平均誤差約為 3.73%，圖三即為 $q_p = 31.0 \text{ kW/m}^2$ 時，經驗公式與實驗值之比較圖。

圖四為強制空氣對流場中，定頻與變頻式噴霧在調控機制作用下， h_{comb}/h_{air} 與噴霧頻率 f 之關係圖， h_{air} 為純粹空氣對流所得之對流對流係數， h_{comb} 為噴霧冷卻與空氣對流同時作用時所得之對流熱傳係數。變頻式噴霧則是以 $f = 8 \cdot \Delta T + 40$ 作為變頻噴霧頻率與溫差之關係式。

若以頻率 300Hz 與 400Hz 為分界點，將圖四分為 I、II、III 等區域，則觀察定頻噴霧結果，可以發現三條曲線在區域 II 中有斜率趨緩的現象，這是因為頻率高於 300Hz 後，發熱平板產生之熱能無法即時蒸發落下之液滴，導致液滴在平板上逐漸累積而形成液膜，造成斜率趨緩之現象。接著觀察定頻與變頻曲線可以發現，不論是定頻或是變頻噴霧，會有 $Re=800$ 所得之 h_{comb}/h_{air} 會略小於 $Re=400$ 及 600 之現象，這是因為 $Re=800$ 所得之 h_{air} 比 $Re=400$

及 600 之結果高的多，造成 $Re=800$ 所得之 h_{comb}/h_{air} 值會略小於 $Re=400$ 及 600 。

接著比較圖四、圖五及圖六，經由觀察可以發現變頻噴霧在 Re 為 600 及 800 時，得到之 h_{comb}/h_{air} 比值，將會隨著熱通量的增加而有逐漸小於 Re 為 400 之比值的趨勢，這是因為隨著 q_p 與 Re 之增加，使得平板表面之熱對流現象更加旺盛，以致於 h_{air} 會隨著 q_p 與 Re 之增加而有上升之趨勢，因而造成 Re 為 600 及 800 之 h_{comb}/h_{air} 比值將會隨著熱通量的增加而有逐漸小於 Re 為 400 之比值的現象。

3、參考文獻

- Asai, A., Hara, T. and Endo, I., "One-dimensional model of bubble growth and liquid flow in bubble jet printers," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 26, pp. 1794-1801, 1987.
- Asai, A., "Bubble dynamics in boiling under high heat flux pulse heating," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 113, pp. 973-979, 1991.
- Asai, A., "Three-dimensional calculation of bubble growth and drop ejection in a bubble jet printer," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 114, pp. 638-641, 1992.
- Chen, R. C., Chow, L. C., Navedo, J. E. "Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 4033-4043, 2002.
- Choi, K. J. and Yao, S. C., "Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting spray," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 30, no. 2, pp. 311-318, 1987.
- Grissom, W. M. and Wierum, F. A., "Liquid spray cooling of a heated surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 24, pp. 261-271, 1981.
- Heffington, S. N., Black, W. Z. and Glezer, A., "Vibration-induced droplet

cooling of microelectronic components,” *Inter Soc. Conf. on Thermal Phenomena*, pp. 328-332, 2000.

Hagen, K. D., “Heat transfer with applications,” PRENTICE HALL, 1999.

Hodgson, J. W., Sunderland, J. E. and Saterbak, R. T., “An experimental investigation of heat transfer from a spray cooled isothermal cylinder,” *ASME J. Heat Transfer*, pp. 457-463, 1968.

Ma, C. F. and Tian, Y. Q., “Experimental investigation on two-component jet impingement heat transfer from simulated microelectronic heat sources,” *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol. 17, pp. 399-408, 1990.

Oliphant, K., Webb, B. W. and McQuay, M. Q., “An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 18, pp. 1-10, 1998.

Pedersen, C. O., “An experimental study of the dynamic behavior and heat transfer characteristics of water droplets impinging upon a heated surface,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 13, pp. 369-381, 1970.

Qiao, Y. M. and Chandra, S., “Spray cooling enhancement by addition of a surfactant,” *ASME J. Heat Transfer*, vol. 120, pp. 92-98, 1998.

Sehmbey, M. S., Pais, M. R. and Chow, L. C., “Effect of surface material properties and surface characteristics in evaporative spray cooling,” *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 6, no. 3, pp. 505-512, 1992.

Smyth, R. and Salman, Y. K., “Combined free and forced convection heat transfer in a rectangular duct,” *INT. COMM. Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 669-680, 1991.

Tartarini, P., Lorenzini, G. and Randi, M. R., “Experimental study of water droplet

boiling on hot, non-porous surfaces,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 437-447, 1999.

Tseng, F. G., *A Micro Droplet Injector System*, UCLA Ph.D. Dissertation, 1998.

Webb, B. W., Queiroz, M., Oliphant, K. N. and Bonin, M. P., “Onset of dry-wall heat transfer in low-mass-flux spray cooling,” *Exp. Heat Transfer*, vol. 5, pp. 33-50, 1992.

“FLEX 10K Embedded Programmable Logic Device Family,” ALTERA, Jan., 2003.

王安邦、林志宏及陳祈彰，液滴撞擊加熱平板之模態分析，力學系列 B，第十七卷，第一期，頁 39-49，2001 年六月。

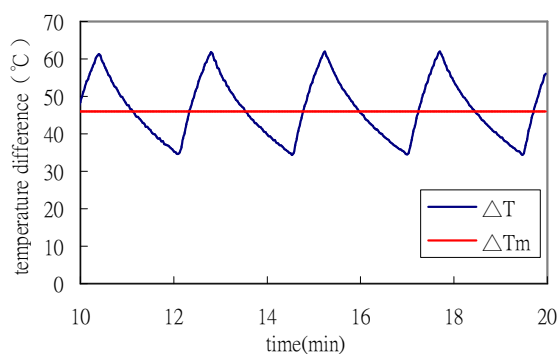
白中和，RS-232C 技術詳解與應用，全華圖書，1989 年。

李金祥，精微噴霧對流冷卻實驗觀測，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，2001 年。

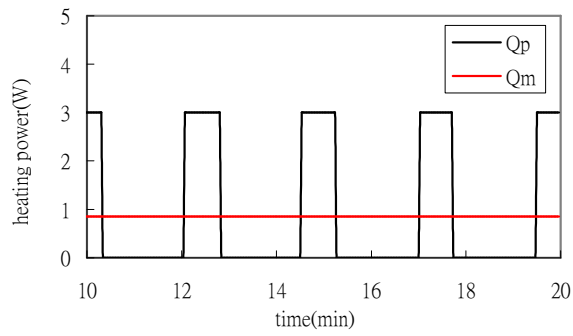
陳文成，熱氣泡式噴墨印頭噴墨過程之研究，國立台灣大學機械工程學研究所博士論文，1998 年。

陳雨村，精微噴柱粒化現象之觀測研究，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，1999 年。

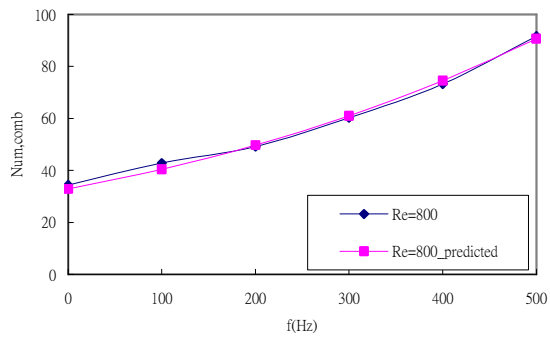
康顧嚴，精微噴霧冷卻實驗觀測，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，2000 年。



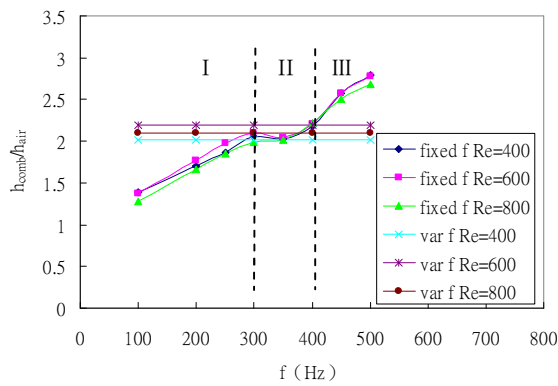
圖一 典型的發熱平板瞬時溫差與平均溫差



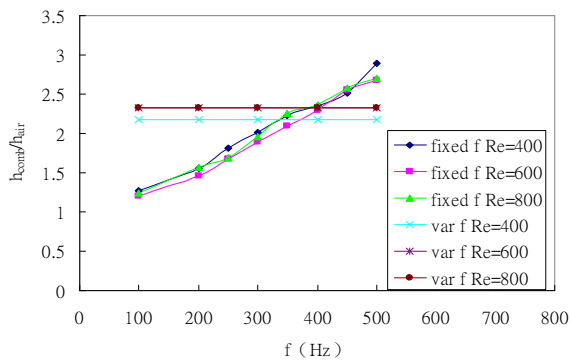
圖二 典型的瞬時加熱功率與平均加熱功率



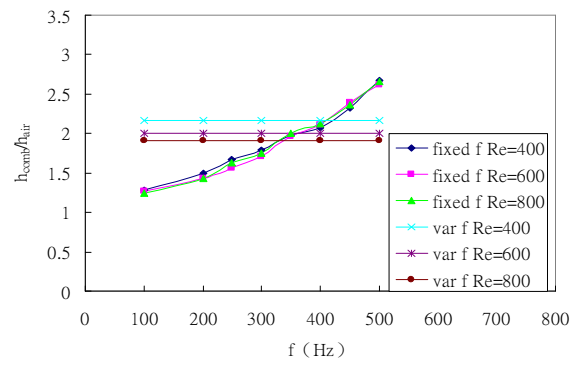
圖三 定頻噴霧 $q_p = 31.0 \text{ kW/m}^2$ ， f 與 $Nu_{m,comb}$ 之關係圖



圖四 定頻噴霧 $q_p = 18.6 \text{ kW/m}^2$ ， f 與 h_{comb}/h_{air} 之關係圖



圖五 定頻噴霧 $q_p = 24.8 \text{ kW/m}^2$ ， f 與 h_{comb}/h_{air} 之關係圖



圖六 定頻噴霧 $q_p = 31.0 \text{ kW/m}^2$ ， f 與 h_{comb}/h_{air} 之關係圖