

結合微流道熱沉之熱電冷却裝置性能探討

Performance of Thermoelectric Cooler Integrated with Microchannel Heat Sinks

陳業豐 簡瑞與

Y.F Chen, R.Y.Jian

國立中興大學 機械工程學系

摘要

本研究之目的主要是利用一熱電致冷器(TEC)來冷却一固定體積的水，並使用半導體微加工技術蝕刻出微流道熱沉(MCHS)放置在 TEC 的熱面來帶走熱面的熱量，並建立整個熱電冷却系統的理論模式與實驗數據相互證及預測在不同時間之水槽內的水溫。由實驗數據可知水槽內的水溫隨著時間的增加而減少，且理論所預測的溫度則與實驗數據蠻吻合的。然而，從理論模式得知其為熱沉熱阻與 TEC 之輸入電流的函數，藉由輸入這兩個參數可以得到水槽內的最低溫度 T_l 。當固定輸入電流，減少熱沉熱阻時水槽的最低溫度也會隨之減少，另外在固定熱阻時，增加輸入電流也可以達到更低的水槽水溫，此外、必需注意熱沉熱阻值太大時而將使得 TEC 無明顯的冷却效果。

關鍵字：熱電致冷器(TEC)、微流道熱沉(MCHS)、熱阻

Abstract

The major goal of the present study is using the thermoelectric cooler for cooling a fixed volume of water, the microchannel heat sink were fabricated by using IC-based micromachining techniques is employed at the TEC hot side to dissipate heat, and a theoretical model on lumped system is established and used to predict the transient behavior of water temperature variation with time. The measurements show that temperature of water decreases with time. The theoretical predicted temperature is in good agreement with the measured data. Base on the theoretical model, the relationship between minimum temperature of water, heat sink thermal resistance, and TEC electric current input. When decreases heat sink thermal resistances, it can found minimum temperature decreases as electric current constant. Moreover, the minimum temperature can also be decreased by increasing the electric current as heat sink thermal resistance constant. On the other hand, there is no cooling effect for the large TEC electric current input when poor heat sink is used.

Keywords: Thermoelectric cooler; Microchannel heat sink; thermal resistance; Lumped system

一.前言

在現今資訊化社會中，隨著科技的進步，各種電子資訊產品都朝著輕薄短小化發展，以半導體為例，晶片製造在高密度、低線寬的發展趨勢下，所衍生出高熱通量的問題將會是限制住元件功能的一大主因。為了解決電子元件高熱通量的問題，已經有許多不同的散熱方式，例如 Cpu 的水冷式裝置及由 Nventive 公司所提出的壓縮機冷凍散熱裝置[1]，雖然利用此裝置可以達到良好的散熱效果，但是必須搭配相容於晶片、基座與主機板的空間因而產生了尺寸限制的問題，故微小化的冷凍循環系統是必需詳加考慮的。在 Phelan et al.[2]的研究中指出目前及未來用於大功率微電子元件的幾種微小冷凍機冷卻系統，其中微型蒸汽壓縮冷凍機是未來電子溫控的一種，其散熱功率可達 350W，最低溫為 12°C。目前微蒸汽冷凍機尚在微機電系統開發階段，而主要的問題則是微壓縮機的設計與製造非常困難。然而，其它可能滿足未來需求的冷卻方還有小型毛細幫浦迴路 (CPL)，除了工作流體是由毛細力所驅動外，該系統的操作原理與蒸汽壓縮冷凍機類似。微型冷卻系統中，微型蒸汽壓縮冷凍機與小型毛細幫浦迴路系統在市場上並無商業上的流通，目前維一成為商品的微型冷卻系統只有熱電致冷器 (TEC)。雖然 TEC 的性能係數偏低，然而其具備了體積小、無噪音、精確的控制晶片接點溫度到恆溫等優點，仍使 TEC 成為未來冷卻系統發展中一個重要的方向。

TEC 常應用於需要維持穩定低溫操作之元件中，其操作狀況會受到輸入電流、熱面散熱器的性能、熱電材料性質的影響。在 Hammound et al.[3]的研究中提到使用一水冷式交換器，當輸入水溫降低時可以得到一較佳的冷卻能力，另外，在 Riffat et al.[4]的研究中則提到冷面使用一 PCMs 的材質可以維持空間中的溫度及風扇的開關對於 TEC 冷卻能力的影響。然而，TEC

的熱面的散熱器通常為氣冷式(風扇+散熱鰭片)，雖然其熱阻可以降至約 0.1°C/W[5]，但是此裝置通常很大且安置在空間不受限制的地方。為了要降低其熱阻值與縮小體積，故我們可以用微流道熱沉來代替。近幾年來小面積的熱傳區域已經有效的利用微流道來散熱，由於系統微小化之後，熱對流係數提高及散熱鰭片的接觸面積增加的原故，所以微流道熱沉的單位面積熱傳量會比傳統熱沉來的多。在 Tuckerman and Pease[6]的研究中提到，假設工作流體為完全展開的層流，固定泵浦的功率的情況下，其熱通量可以達到 790W/cm²。而 Landram[7]所建立的最佳化程序，結果顯示了散熱性能和基材的熱傳導性與流道的深寬比有密不可分關係。Knight[8]改變了原來散熱片的厚度與流道寬度的比後，使得熱阻和原先的設計相較下減少了 30%。

本研究將以矽為基材，使用微製造技術來建立不同水力直徑及流道深寬比的微流道熱沉，並且將使用微流道熱沉結合的熱電冷卻系統來冷卻一固定體積的水並予以整合分析 TEC 熱端的散熱性能對於冷面的冷卻能力的影響及與使用氣冷式的散熱器時之冷卻效果比較。此外利用實驗之結果，以及熱電致冷器的基本理論，建立整個熱電冷卻系統的理論模式，最後和實驗結果相互驗證。

二. 理論模式

2.1 微流道熱沉理論

微流道熱沉可以使用體型細微加工法製造而出，如圖 1 所示。微流道熱沉整體的長度為 L，寬度為 W 流道的高度為 H_c，熱沉底部基板厚度為 H_t，流道底部寬度為 W_b，鰭片寬度為 W_f，假設微流道熱沉頂部絕熱，熱能則是由 MCHS 底部輸入，熱沉吸入熱量後，由工作流體把熱沉的熱量帶走。熱沉的散熱能力可由熱沉熱阻 R_{th} 來評估，其定義為出口壁溫 T_{w,max} 與入口流體 T_{fin}

的溫度差除以實際散熱的熱量 q 。其表示如下：

$$R_{th} = \frac{T_{w,max} - T_{fin}}{q} = R_{cap} + R_{fin} + R_{cond} \quad (1)$$

(2)~(4)式為流體進入熱沉所產生的熱阻 R_{cap} 、鰭片熱阻 R_{fin} 、基板厚度所產生的傳導熱阻 R_{cond} 之基本公式。

$$R_{cap} = \frac{T_{fout} - T_{fin}}{q} = \frac{1}{\rho_f \mathfrak{V} C_p} \quad (2)$$

$$R_{fin} = \frac{1}{h_f A_{eff}} \quad (3)$$

$$R_{cond} = \frac{H_t}{K_s WL} \quad (4)$$

其中 \mathfrak{V} 、 h_f 、 A_{eff} 、 K_s 分別為輸入熱沉之體積流率、流體熱對流係數、熱沉中有效熱傳面積、矽基材之熱傳係數[9-10]。

2.2 熱電致冷器之冷卻模式建立

一般來說，熱電致冷器的效率與冷面溫度 T_c 和熱面溫度 T_H 、熱電模組本身之電阻係數 ρ 與熱傳導係數 κ 、輸入電流 I 的大小、冷面與負載表面之接觸電阻 R_1 、熱面接觸的熱沉本身的熱阻 R_2 有關。如圖 2 所示為整合熱電致冷器於冷卻時與各參數間的關係。其中致冷晶片冷端產生一熱功率 Q_c 可以使水槽的熱功率移除並維持在固定的溫度 T_i 下， R_1 為熱電致冷端與水槽表面接觸之熱阻亦為散熱膏的熱阻 R_{j1} 加上水槽本身的熱阻 R_{tank} 之和，要操作致冷晶片時需輸入一電功率 Q_p ，其熱面溫度 T_H 與冷面溫度 T_C 則產生一溫差 ΔT ，由熱電致冷器之工作原理得知由熱面散熱至環境溫度 T_a 的總功率為水槽之熱移除功率與熱電晶片本身輸入之電功率之總和。(5)~(8)分別為計算 TEC 冷面熱移除功率 Q_c 、熱端功率 Q_H 、本身之電功率 Q_p 、TEC 性能係數 COP 之基本公式。

$$Q_c = 2N \left[\alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G_e} - \kappa G_e (T_H - T_c) \right] \quad (5)$$

$$Q_H = 2N \left[\alpha I T_H + \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G_e} - \kappa G_e (T_H - T_c) \right] \quad (6)$$

$$Q_p = 2N \left[I^2 \frac{\rho}{G_e} + \alpha I (T_H - T_c) \right] \quad (7)$$

$$COP = \frac{Q_c}{Q_p} \quad (8)$$

其中， N 代表致冷器中熱電偶之對數， α 為 Seebeck 係數， G_e 為熱電偶的長度與斷面積的比值，而水槽之目標溫度 T_i 與熱面溫度則可以由熱面與冷面的能量平衡關係來求得，如式子(9)、(10)表示。

$$T_i = T_c + Q_c R_1 \quad (9)$$

$$T_H = T_a + Q_H R_2 \quad (10)$$

三. 實驗設備與方法

圖 3 為本實驗之實驗架構，在入口貯水槽的冷卻流體經由定量泵浦驅動打入測試模組的微流道熱沉試片中，經由熱電致冷器熱端提供一熱源作一熱交換後流進出口之貯水槽。冷卻流體的入出口溫度及進口壓力的量測分別為 T-Type 熱電偶(thermocouple)與壓力轉換器量測而得，量測所得的訊號皆為電壓訊號必須使用訊號擷取卡，將電壓訊號轉成類比訊號傳至電腦中，藉由一 LabVIEW 程式語言軟體，其可用在資料擷取(DAQ)與影像擷取(Image Acquisition)上，故可以在自己所設計之量測儀表上得知即時的量測結果。本實驗的微流道熱沉測試晶片其流道的幾何形式及詳細的幾何尺寸如圖 4、圖 5、表 1 所示，本實驗的量測時間為三小時，以十分鐘為一記錄點來完成所有的實驗記錄，實驗中最主要的操作參數為工作流體之流量與微流道熱沉的幾何形狀，而實驗測試結果主要記錄為工作流體之流量、熱沉入口與出口溫度及入口壓力、水槽內之水溫。

四. 結果與討論

4.1 流量與溫度的關係

在本實驗中由於泵浦的壓力源為固定，所以在不同水力直徑下的微流道熱沉所量測之冷卻流體的體積流率皆有所不同，其範圍為 289 至

1070ml/hr 之間。圖 6 為六種微流道熱沉在固定流量下所量測到的水槽溫度 T_i 與。由圖中可知，因為 TEC 把熱移除的原故，而水槽水溫與熱沉出口溫度都隨著時間而下降，當流體流率增加時則可以使水槽內溫降低，而量測到熱沉出口溫度除了隨著時間改變外，流體流量的增加，出口溫度也隨之下降，然而利用溫度則可以算出熱沉所吸收的熱量。

4.2 微流道熱沉與氣冷式散熱裝置比之比較

圖 7 為兩種散熱裝置的冷却性能比較圖，由圖中可知我們選擇 MCHS#4、流量為 1070ml/hr 的熱沉與氣冷式散熱器作比較，其最低的水溫度只差 1°C 左右，而由流量與溫度的關係得知，我們只要再提高 MCHS#4 的輸入流量應該可以達到一樣的冷却能力，但是也需考慮當流量增加時，壓力隨之增加，可能會使晶片損毀。

4.3 熱沉熱阻的計算及與理論熱阻之比較

熱阻的定義為(1)式所示，本實驗熱阻的計算可由熱沉理論模式與量測所得數據而得，然而在量測 $T_{w,\max}$ 時，必須把熱電偶放置在熱面與熱沉底部基板之間，但是這樣會使熱面與熱沉無法完全貼合進而影響冷却能力，所以我們假設熱能均勻的傳至熱沉上，故熱面溫度 T_H 會等於 $T_{w,\max}$ ，再利用廠商所提供的關係式[11]求出熱面溫度，再利用實驗數據算出熱阻值。圖 8 為六種微流道熱沉在量測時間的熱阻變化情形；從圖中可以看到每種型式的熱沉在固定流量及流道幾何尺寸下其熱阻值皆為定值也證明了實驗數據的準確度。圖 9 為總合六種微流道熱沉在不同流量下的熱阻變化，由圖中可知當流量增加時，熱阻值相對的會減少。此外，可能本實驗中的熱沉深寬比太小而不足以影響熱阻值，故還是以流量為主要的影響因素。圖 10 為實驗熱阻與理論熱阻的比較圖，由圖中可知實驗熱阻比理論值還大，其原因為本實驗所設計的熱沉包括了入口與出口之集水區，而理論模式只算流道區域的熱阻，故利

用實驗數據算出的熱阻值才是真正的熱沉熱阻。

4.4 熱電冷却系統模擬分析

本實驗中每個實驗量測的資料記錄都要三個小時，如果我們增長實驗記錄的時間，在固定熱沉的熱阻及 TEC 的操作電流下，水槽內的溫度 T_i 將會下降至一定溫，在這個狀態下 TEC 的冷却負載變為零亦即為一平衡的狀態。因此為了驗證實驗結果是否準確與預測在不同電流及熱阻的條件下 T_i 最低之溫度，因此結合了微流道熱沉與熱電致冷器之理論模式，建立出本實驗熱電冷却裝置中冷端溫度與工作時間的關係式(其中假設貯水槽目標溫度 T_i 近似於熱電冷端溫度)，並利用此式模擬出來的結果與實驗結果相互印證及預測在不同時間的暫態水溫。(11)式則為本本文結合微流道熱沉與熱電冷却裝置所建立冷面溫度 T_c 相對於時間的關係式。

$$\frac{dT_c}{dt} = -\frac{2N}{\rho_f C_p V_{\text{tank}}} \left[(\alpha I + \kappa G_e - \frac{2N\kappa^2 G_e^2 R_{th}}{1 + 2N(\kappa G_e R_{th} - \alpha I R_{th})}) T_c - \left(\frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G_e} + \frac{\kappa G_e T_{fin} + \kappa N I^2 \rho R_{th}}{1 + 2N(\kappa G_e R_{th} - \alpha I R_{th})} \right) \right] \quad (11)$$

由上述關係式可知，其中只有熱電致冷器之輸入電流與微流道熱沉之熱阻為未知數，其餘皆為已知，故只要輸入未知之參數並利用數值分析的方法(Runge-Kutta method)來求得工作時間相對於冷端溫度的值並和實驗結果相互印證。圖 11 為實驗所量測計算出最低與最高的熱阻並代入我們所建立的理論模式所得的 T_i 與實驗數據 T_i 之比較圖，由圖中可知這兩個熱沉的熱阻所得的實驗 T_i 與理論 T_i 的曲線相當的接近，基於此結果我們可以在本文中把微流道熱沉與 TEC 的性能整合起來使用理論模式來代替實驗量測並且可以模擬很久的時間直至一平衡狀態。圖 12 為輸入不同電流、熱阻值之理論 T_i 之比較圖，由圖中可知當固定電流時，配合較低熱阻值可以得到較低之溫度、而增加輸入電流時亦可達到降低溫度之效

果，但必須配合低熱阻之熱沉以免無明顯之冷卻效果。圖 13 為總結在不同電流及熱阻下的能達到最低的水槽溫度 T_c ，由圖中可看到輸入電流為 1A 時並使用 0.5k/w 的熱阻時才可達到 -1°C 左右，由此可知在輸入低電流的條件下要達到很低的溫度是不太可能的除非使用一個非常好的熱沉。另外，如果輸入一較大的電流時，也必須使用較好的熱沉以免無法將熱量排出，而造成冷卻效果不彰。

五. 結論

在本文中整合了微流道熱沉與熱電致冷器來冷卻一水槽內初溫為 25°C 的水。微流道熱沉則是利用半導體的微加工技術來完成，本實驗中完成了水槽內溫度、熱沉入出口溫度的量測，並藉由量測數據來算出估算出熱沉的熱阻值。而我們算出的熱沉熱阻值實際上會比理論模式算出的熱阻還大，最後建立了整個熱電冷卻系統的理論模式來描述冷凍過程中的暫態溫度。此理論模式則與 TEC 輸入電流及熱沉熱阻有關，當增加 TEC 輸入電流或是減少熱沉熱阻時都可減少水槽內之最低溫度，然而不管使用高或低電流時，只要是配合一很差的熱沉，其最低的溫度則無法達到 -1°C 以下。

六. 參考文獻

- [1] Tom homepage. <http://www.aceshardware.com>
- [2] P. Phelan, V. Chiriack, T.Y. Lee, "Current and Future Miniature Refrigeration Cooling Technologies for High Power Microelectronics, 17th IEEE SEMI-THERM Symposium, (2001) 158-167.
- [3] Y.J. Hammoud, J. Zhou, "Effects of the Liquid Inlet Temperature on the Thermoelectric Cooler Performance in a Liquid-TEC Thermal System," 21st IEEE International Conference on Thermoelectronics, (2002) 506-510.
- [4] S.B Riffat, S.A. Omer, X. Ma, "A Novel Thermoelectric Refrigeration System Employing Heat Pipes and a Phase Change Material: an Experimental Investigation," Renewable Energy, 23 (2001) 313-323.
- [5] M.B. Kleiner, S.A. Kuehn, K. Habberger, "High Performance Air Cooling Scheme Using Ducted Microchannel Parallel Plate-Fin Heat Sinks," Eleventh IEEE SEMI-THERM Symposium, (1995) 122-130.
- [6] D.B. Tuckerman, R.F. Pease, "High-Performance Heat Sink for VLSI," IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-31, (1985).
- [7] C.S. Landram, "Computational Model for Optimizing Longitudinal Fin Heat Transfer in Laminar Internal Flows," Heat Transfer in Electronic Equipment, ASME, (1991).
- [8] R.W. Knight, J.S. Goodling, D.J. Hall, "Optimal Thermal Design of Forced Convection Heat Sinks-Analytical," J. Electronic Packaging, 113 (1991) 313-321
- [9] W. Qu, I. Mudawar, "Thermal Design Methodology for High-Heat-Flux Single-Phase and Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks," IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena, (2002) 347-359.
- [10] Z. Wen, C.K. Fah, "The Optimum Thermal Design of Microchannel Heat Sinks, 1997 IEEE/CPMT Electronic Packaging Technology Conference, (1997) 123-129.
- [11] Melcor homepage. <http://www.melcor.com>

七. 圖表彙整

表 1 微流道熱沉幾何型式

Channel	Wt (μm)	Wb (μm)	H (μm)	Dh (μm)	no of channel	Cross-linked channel
#1	200	144.85	39	65.27	89	No
#2	500	450.05	35	65.42	35	No
#3	400	344.85	39	71.07	44	No
#4	400	269.91	92	149.59	44	No
#5	200	144.85	39	65.27	89	Yes
#6	150	83.54	47	71.57	119	Yes

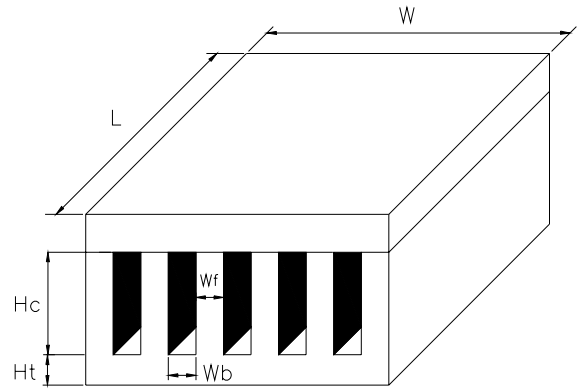


圖 1 微流道熱沉幾何形狀

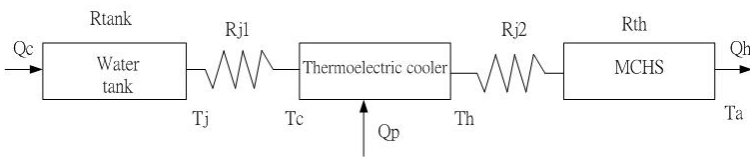


圖 2 熱電冷却系統與各參數的關係

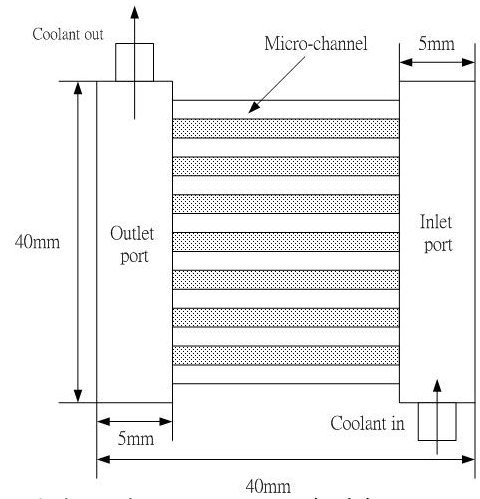


圖 4 規則(regular)的微流道熱沉

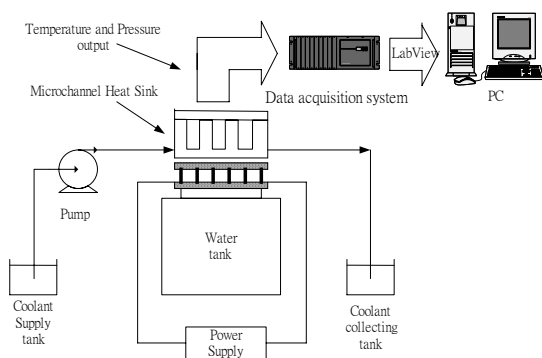


圖 3 實驗架構示意圖

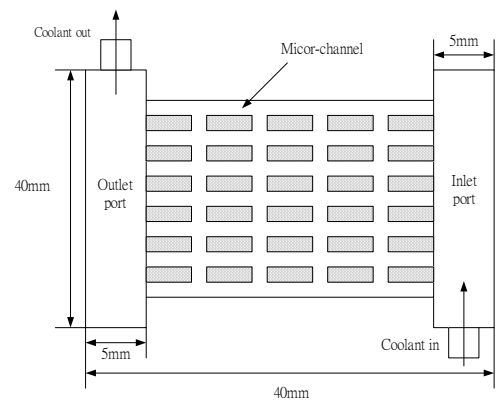


圖 5 Corss-linked 微流道熱沉

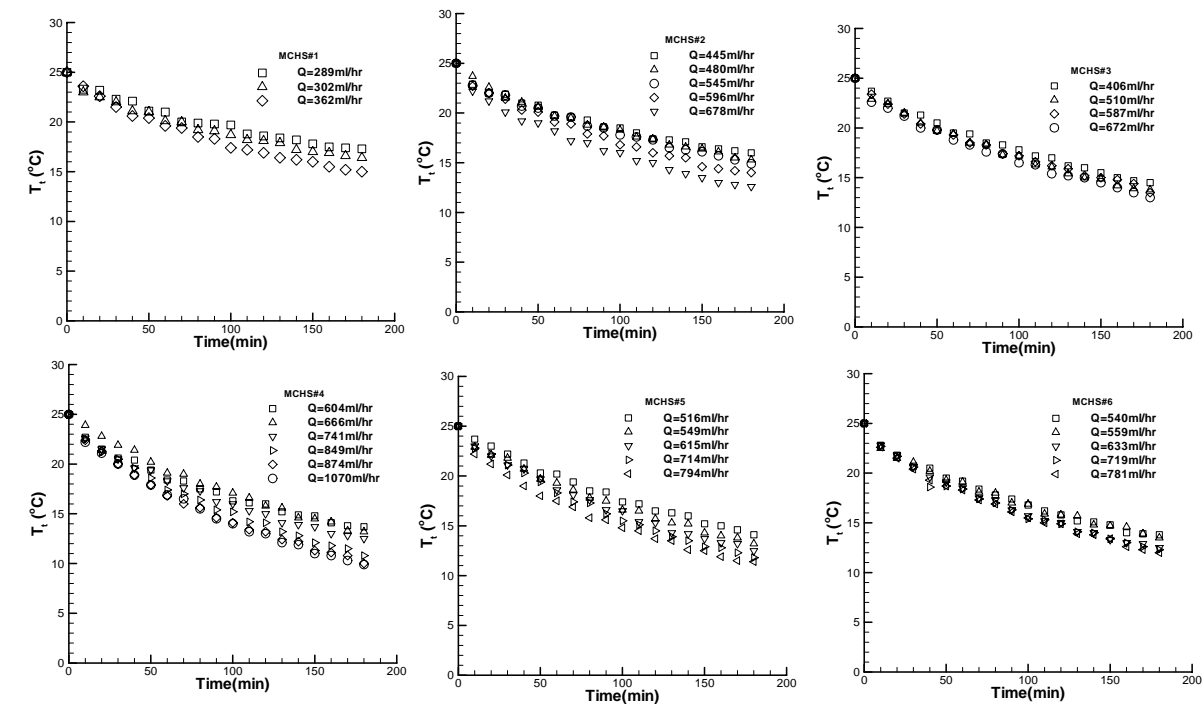


圖 6 不同流量、微流道幾何尺寸條件下的水槽內之水溫

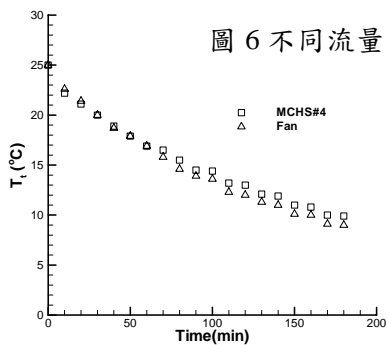


圖 7 熱沉與氣冷式散熱裝置的冷卻性能比較

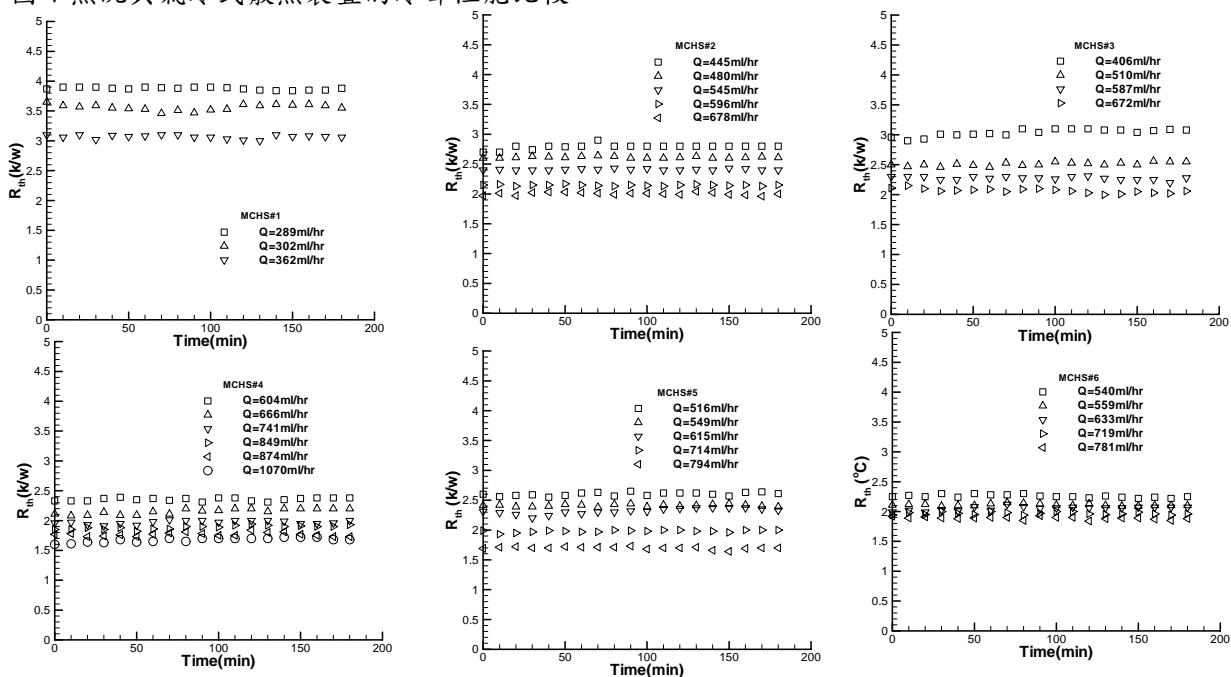


圖 8 微流道熱沉在各量測時間的熱阻變化圖

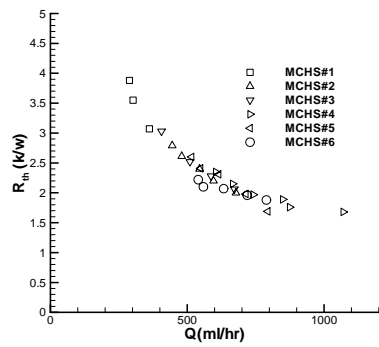


圖 9 微流道熱沉在不同流量下的熱阻值

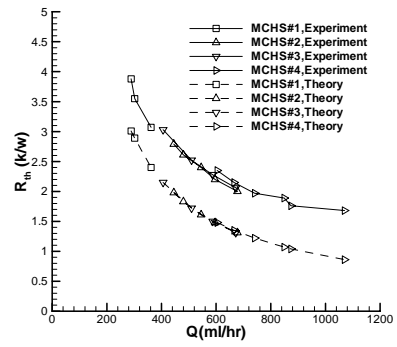


圖 10 理論熱阻與實際熱阻之比較

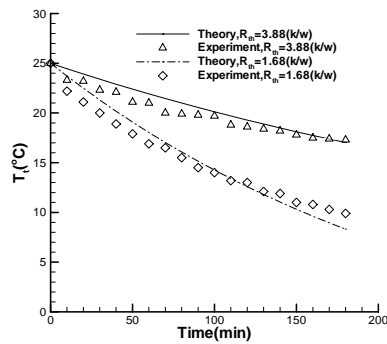


圖 11 實驗之最高與最低熱阻之實驗 T_i 與理論 T_i 之比較

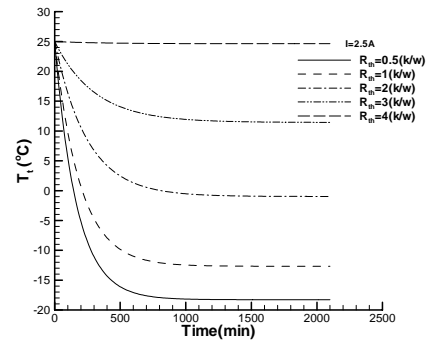
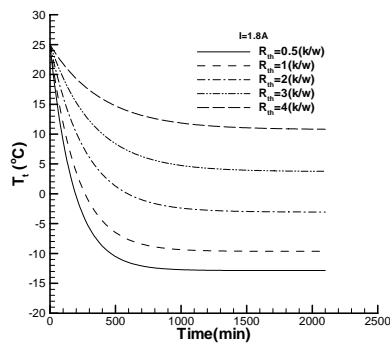
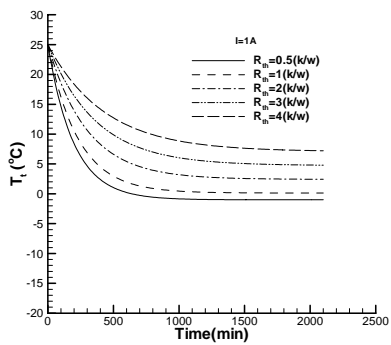


圖 12 不同電流、熱阻值之理論 T_i 之比較

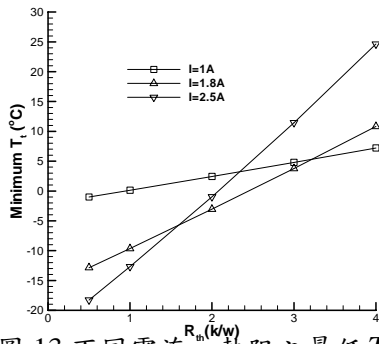


圖 13 不同電流、熱阻之最低 T_i 之比較