第三章　實驗方法

3.1 實驗設備與配置

實驗設備配置圖如圖 3.1 所示。配置圖各項設備與其他設備分別說明如下：

(1)加熱台(heater)：如圖 3.2 所示。加熱面積為 1×1 cm^2，外圍使用陶瓷材料和電木做絕熱。距離加熱面 0.5 mm 埋入三根熱電偶，彼此之間距離為 1 cm。

(2)恆溫水槽(constant temperature water tank)：流量為 24 g/s，將冷卻水溫度控制於 20℃。

(3)電供應器(power supply)。

(4)資料擷取器(data logger)：FLUKE HYDRA Series Ⅱ。

(5)真空幫浦(vacuum pump)：避免系統污染的發生，本研究採用乾式幫浦(dry pump)，其真空極限為 8×10^{-3} Torr。

(6)燒結爐(sintering furnace)：燒結爐採用振華電熱公司製作的管狀氣氛燒結爐，其程式控制器可控制加熱曲線，最高加熱溫度可達 1200 ℃，而爐內鋼管的尺寸為長 120 cm、直徑 10 cm，裡面有放置一組 K-type 熱電偶用來量測爐內的溫度。

(7)導熱膏(thermal grease)：Corning TC-5021，灰色，熱傳導係數為 3.5

W/mK。

(8)熱電偶(thermocouples)：K-type，Omega KMQX-040-G。誤差為 0.1 ℃。

(9)彈簧壓力座(pressure bar)：如圖 3.3 所示，單一彈簧係數為 1.25 kg/m。整體壓力控制於 3~5 kg。

本實驗之熱電偶配置如圖 3.4 所示。在熱源接觸面上方埋入一根熱電偶(T1)且在所對應之位置於平板熱管內部埋入另一根熱電偶(T2)；在絕熱區於玻璃外部埋入二根熱電偶(T3、T4)；在冷凝區於無氧銅板內埋入二根熱電偶(T5、T7)且於平板熱管內部 T5 與 T7 中間埋入另一根熱電偶(T6)；在冷板入出口皆放置一根熱電偶(T8、T9)；在加熱銅塊上埋入三根熱電偶(T10、T11、T12)，彼此間距為 2 mm，最上層的溫度點距離加熱面為 0.5 mm。T13~T18 為測量實驗誤差所用，詳細說明於 3.2 節。

3.2 實驗設計

本研究以平板熱管蒸發熱阻為主軸，實驗設計將以測量內部工作流體溫度與觀察內部現象為重點，且以真實平板熱管工作之情形下，探討蒸發熱阻與內部物理現象之關聯。實驗設計之主軸如下所示：

(1) 可視化之平板熱管

(2) 非開放式工作流體循環系統

(3) 內部工作流體之溫度量測

(4) 中高度真空系統

(5) 以金屬網為主之毛細結構

(6) 單側冷板冷凝裝置

分別詳細說明如下：

(1)可視化平板熱管：為了能夠真實的觀察平板熱管內部的物理現象，本研究將以可視化的方式進行，設計圖如圖 3.5 所示。本實驗之平板熱管是採用組裝式設計，優點可以方便的改變金屬網毛細結構的排列組合與厚度且能重複使用。為了可以達到觀察的目的，將最上層不鏽鋼銑空形成觀察區，以便攝影機拍攝或肉眼直接觀察。

平板熱管內部腔體尺寸為 30(寬)×120(長)×5(高) mm^3，其中蒸發區長度為 10 mm、冷凝區為 50 mm，剩下為絕熱區 。無氧銅板厚度為 3 mm，為了避免過多的熱藉由無氧銅板傳遞至冷凝區，在底板熱源接觸面周圍銑入深 2 mm 之回字型溝槽，並在銅板底部埋入六個溫度點(T13~T18)以計算銅板傳遞之熱量如圖 3.6 所示。

(2)非開放式工作流體循環系統：工作流體在熱管內部循環的順暢與否也會深深的影響整體熱管所能承受的最大熱傳量！為了實際瞭解內部毛細回水與熱傳現象之間交互作用對蒸發熱阻之影響，本實驗採

用非開放式工作流體循環系統，此即一般熱管內佈真實的運作情形，有別於其他研究所採用的開放式循環系統，能夠更真實的來瞭解熱管內部運作之情形。

(3)內部工作流體溫度之測量：本研究以去離子水(distilled water)做為工作流體，除了測量平板熱管外部之溫度分部以外，為了能夠得到平板熱管內部工作流體真實的溫度，在不鏽鋼結構之側面洗穿兩個小孔以使能夠在蒸發區與冷凝區各埋入一支 K 型熱電偶(K type thermocouples)，藉由此兩種溫度可以分別計算蒸發與冷凝熱阻。

(4)中高度真空系統設計：為了達到真實熱管工作環境之條件，本實驗在不鏽鋼結構與底板之間使用 O-ring 將系統密封，並使用黑膠將玻璃與不鏽鋼結構黏合，優點在於簡化密封系統手續以及能夠保持實驗元件的完整以供重複使用，同時降低實驗成本；缺點在於真空度無法降至太低也無法維持太久。本實驗設計之真空系統可以達到 8×10^{-3} Torr，15 分鐘的回壓也可保持在 8×10^{-2} Torr。本研究之實驗初始的啟動壓力約為 8×10^{-2} Torr。真空度之級別如表 3.1 所示。

(5)以金屬銅網之毛細結構：本研究採用燒結金屬銅網(copper mesh)作為毛細結構，利用 100 目(100 mesh)及 200 目(200 mesh)排列組合作搭配，其規格如表 3.2 所示。在過去平板熱管的研究中，大部分是以溝槽或燒結銅粉作為毛細結構，但這兩種毛細結構所需要的製作成本

過高且花費時間較長，對於燒結銅粉而言還具有相當高的不穩定性且其燒結後之均勻性不易掌控。金屬銅網的優點在於簡單、製程容易以及穩定性高，經過燒結程式之後可以擁有強大的毛細力且能夠有效降低金屬網層之間的接觸熱阻。另外可以藉由金屬網的搭配來提高毛細力又可避免沸騰極限的發生，這項優點是銅粉及其他毛細結構不易達到的。

(6)單側冷板冷凝裝置：本研究所使用的冷凝方式為間接式冷板冷卻(indirect cold plate water cooling)。一般平板熱管的冷卻方式是將冷凝區置入水套(water jacket)中，以水直接冷卻，或是利用冷板將冷凝區完全包住。但本研究為了方便可視化，將冷板置於冷凝區的下端，如圖 3.1 或 3.4 所示；為了彌補冷凝能力之不足，將冷凝區所占熱管的比例增加，其面積為 30×50 mm^2。冷板材質為鋁合金(T6061)，為了增強冷卻效應，在冷板內部銑了流道並在流道壁面製造出凹凸不平的小凹洞以增加熱傳面積，設計如圖 3.7 所示。冷卻水溫與質量流率分別為 20℃及 24 g/s。

3.3 實驗參數與參數範圍

本研究所使用的工作流體為去離子水(distilled water)，電阻值在 17MΩ.cm 以上。實驗參數以毛細結構之排列組合為主，探討在不同

排列組合的情形下對其蒸發熱阻與熱傳機制的影響，分別整理如下：

	毛細結構		
排列組合	1 層 100mesh 網+2 層 200mesh (100+2×200)	2 層 100mesh 網 (2×100)	4 層 200mesh 網 (4×200)
總厚度(mm)	0.4	0.4	0.4
孔隙率(%)	65	63	69
毛細結構飽和含水量理論值(g)	0.93	0.9	0.99

如前所述，金屬網的最大優點在於能夠利用不同的排列組合來達到不同的需求。就細網而言，由於其孔隙尺寸(pore size)較小，能夠提供較強的毛細力與較多的成核址，且細網具有較多的曝露面積(exposure area)能夠增加毛細結構與工作流體之間的熱傳效率，但其較容易達到沸騰極限。對中網而言，雖然毛細力與成核址都不如細網來的好，但其具有較大的開放空間(open space)可能讓發生沸騰極限的機率降低。

為了達到可視化的目的，本研究利用玻璃作為平板熱管的上板且並沒有毛細結構覆蓋，在實驗過程中會有部分冷凝水殘留餘冷凝端的玻璃上，而這些殘留的冷凝水會減少實際存在於毛細結構中的工作流

體，所以本研究無法以理論值作為飽和水量，理論值計算如下：

$$3(\text{寬}) \times 12(\text{長}) \times 0.04(\text{高}) \times \text{孔隙率} \qquad 0.9\ cm^3$$

本研究利用累積的經驗法則找到了比較適合作為飽和之水量，其為 1.4g。低水量與溢水量皆以此飽和量作為比較的基準。注水量的誤差皆在 5%以內。

3.4 實驗步驟

3.4.1 前置作業流程

前置作業流程可分為三大主要流程：(1)清洗流程、(2)燒結流程、(3)注水流程。分別說明如下，

(1)清洗流程

步驟一：將實驗物件置入超音波震盪儀內以 RO 水洗滌 3-5 分鐘，去除物件上的雜質與灰塵。

步驟二：放入超音波震盪儀內以除油劑洗滌 3-5 分鐘，去除物件上不必要的油脂以避免影響物件之親水性。

步驟三：放入超音波震盪儀內以 RO 水洗滌 3-5 分鐘，去除殘留在物件上的除油劑。

步驟四：放入超音波震盪儀內以丙酮洗滌 3-5 分鐘，去除殘物件上的水分，避免氧化的發生。

步驟五：使用氮氣將物件吹乾。

(2)燒結流程：

步驟一：將金屬網與無氧銅板緊密貼合於不鏽鋼夾具中並以扭力鈑手施予固定扭力。

步驟二：將物件至入真空燒結爐中並抽真空至系統壓力為負壓為止。

步驟三：通入氮氣至系統壓力上升至+1.5atm 後再將氮氣關閉。

步驟四：通入氫氣並維持系統為正壓，約+1.5atm 左右。

步驟五：啟動燒結爐，加熱溫度為 900℃，加熱時間與持溫時間皆控制為 1 個半小時，之後開始自然冷卻至室溫便可取出。

(3)注水流程(配合圖 3.8)：

步驟一：確定所有閥件皆是關閉狀態。

步驟二：將工作流體注入注水玻璃管中並開啟真空幫浦。水注入玻璃管之前須先煮沸，以避免不凝結氣與殘留水中的部分氧氣。

步驟三：開啟閥 3 與閥 4 直至壓力計顯示為 10^{-3} Torr 為止。

步驟四：開啟閥 1 與閥 5 並持續抽 15 分鐘至壓力計顯示為 $8x10^{-3}$ Torr 為止。

步驟五：關閉閥 3 與閥 1 並將閥 2 打開使水能夠進入熱管內。

步驟六：確定注入量之後關閉閥 5 並使用真空剪在 A 處剪斷即完成注水流程。

3.4.2 實驗進行流程

本研究之實驗從 20W 開始進行，並以 20W 為一間隔直至蒸發熱阻值往上升或乾化為止。本研究定義之穩態為 5 分鐘各點溫度跳動範圍在 0.2℃之內。每一組瓦數進行至穩態之後，便移開蒸發區上端的絕熱棉以拍攝內部熱傳機制。

3.5 實驗數據計算方式

1. 總輸入瓦數(Q_T)

$Q_T = I \times V$，其中，I：電流；V：電壓。實際輸入的瓦數可以由 T10、T11 及 T12 之溫度梯度計算獲得，誤差量控制於 5%左右。

2. 熱損失百分率與蒸發熱阻之計算(PPHL、R_E)

本研究利用 3mm 厚之無氧銅板作為平板熱管之底板，雖然在熱源接觸面周圍銑入回字形溝槽以避免熱量藉由銅板傳遞，但由實驗量測結果發現並非所有的熱都藉由工作流體相變化帶走，仍然有少量的熱經由銅板傳導遞至冷凝區，其熱傳遞路徑如圖 3.9 所示。本研究在銅板底部埋入六個溫度點以計算銅板傳遞之熱量(Q_{cond})；利用 Q_{cond} 即可得到相變化所帶走之熱量(Q_{ph})以及因為銅板效應所造成的熱損失，稱之為熱損失百分率(percentage of plate heat loss，PPHL)，

$$Q_{ph} = Q_T - Q_{cond}$$

$$PPHL = (Q_{cond} / Q_T) \times 100\%$$

所以本研究實際計算之蒸發熱阻為：

$$R_E = (T_1 - T_2) / Q_{ph}$$

藉由 PPHL 之大小可以比較出不同情況下所形成蒸發熱阻之差異；當 PPHL 上升時，代表藉由銅板傳遞之熱量亦上升，此可解釋為蒸發區之熱傳能力在下降中，可能是由於毛細結構厚度或液膜太厚或是局部乾化等所導致；反之，當 PPHL 下降時，代表藉由銅板傳遞之熱量亦下降，此可解釋為蒸發區之熱傳能力在上升中，可能是由於沸騰效應或薄液膜蒸發等熱傳機制所導致。所以藉由 PPHL 之大小可以推斷蒸發熱阻之趨勢，在第四章會將此一並納入討論中。

3. 接觸熱阻(R_{cont})

$$R_{cont} = (T_{10} - T_1) / Q_T。$$

TSING HUA UNIVERSITY

3.6 實驗良率檢測

為了確保實驗結果的正確性，本研究訂出以下幾項良率檢測的程式，說明如下：

1.系統真空度：在進行實驗之前，本研究會針對系統之密閉性進行測試。本系統之回壓必須控制在 15 分鐘 8.0×10^{-2} Torr 範圍之內，方可進行實驗；若 15 分鐘之回壓超過 8.0×10^{-2} Torr 則代表系統密閉性不佳，所以本研究之平板熱管的啟動系統壓力為 8.0×10^{-2} Torr。此真空度之定義完全是由經驗而得，當系統回壓超過 8.0×10^{-2} Torr 時，在進

行實驗的過程中，會出現蒸發區毛細結構被氧化的情形。

2.接觸熱阻之大小：藉由接觸熱阻可以判斷熱源與平板熱管是否完全接觸。本研究之接觸熱阻均控制在 0.26 ℃/W±10%的範圍內，以確保每組實驗結果皆在相同的接觸熱阻下進行。此接觸熱阻值之定義是依照 Intel Co.[21]在 2004 年對 Pentium 4 微處理器所訂下的規範(0.05℃/W，加熱面積為 $9cm^2$)。

3.冷凝區之溫差：為了確保冷板與平板熱管之間接觸良好，本研究將冷凝區內部溫度與冷板入出水口平均溫度之溫差維持在每單位瓦數 0.03~0.06 ℃之間。

TSING HUA UNIVERSITY

表 3.1 真空級別表【23】

	粗略真空 Coarse vacuum	中度真空 Intermediate vacuum	中高度真空 Medium-high vacuum	高真空 High vacuum	超高真空 Ultra-high vacuum
壓力範圍 (Torr)	760-100	100-1	$1\text{-}10^{-3}$	$10^{-3}\text{-}10^{-7}$	$>10^{-7}$
氣流型態	連續流	連續流	轉變為分子流之過度型態	分子流	實際無氣流僅單一分子運動
20℃時之平均自由路徑(mm)	$5x10^{-6}\text{-}5x10^{-5}$	$5x10^{-5}\text{-}5x10^{-3}$	$5x10^{-3}\text{-}5$	$5\text{-}5x10^{4}$	$>5x10^{4}$

表 3.2 銅網規格

Mesh Number	**Diameter of Copper Wire(mm)**	**Width of Opening (mm)**	**porosity**
100 Mesh	0.114	0.14	63%
200 Mesh	0.055	0.07	69%

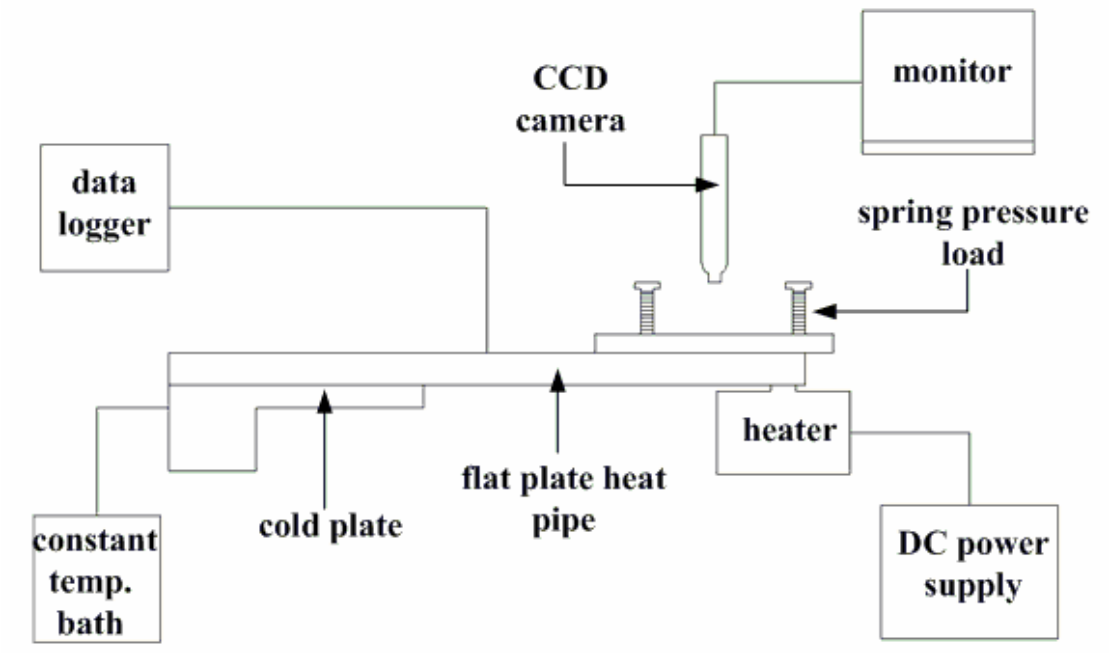

圖 3.1 實驗設備配置圖

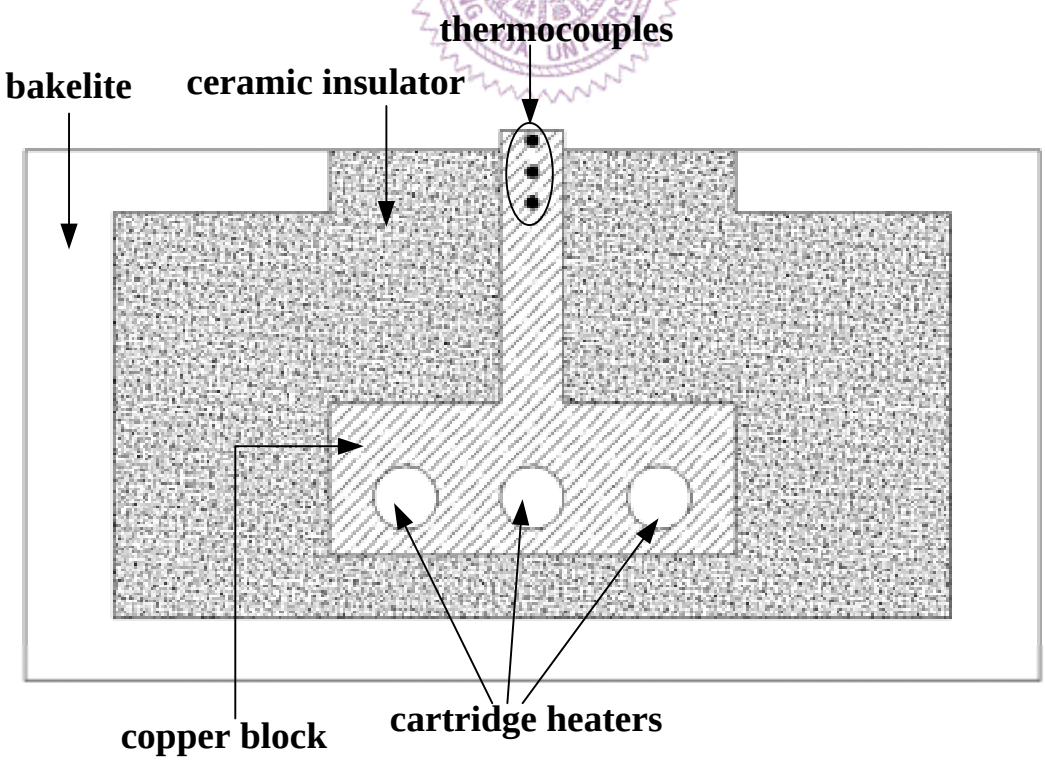

圖 3.2 加熱台剖面圖

圖 3.3 彈簧壓力座

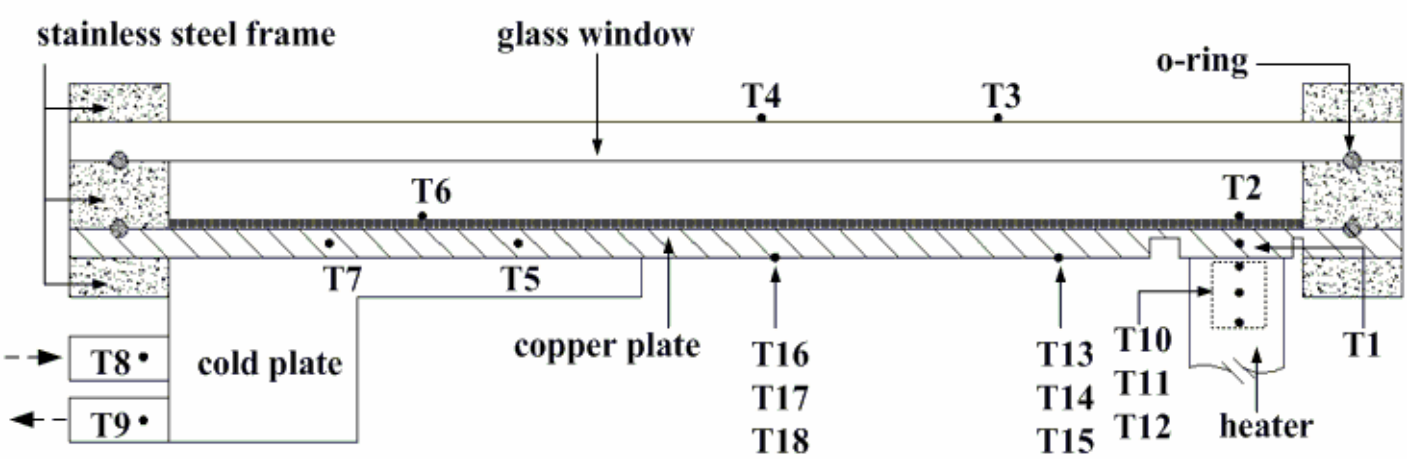

圖 3.4 熱電偶配置圖

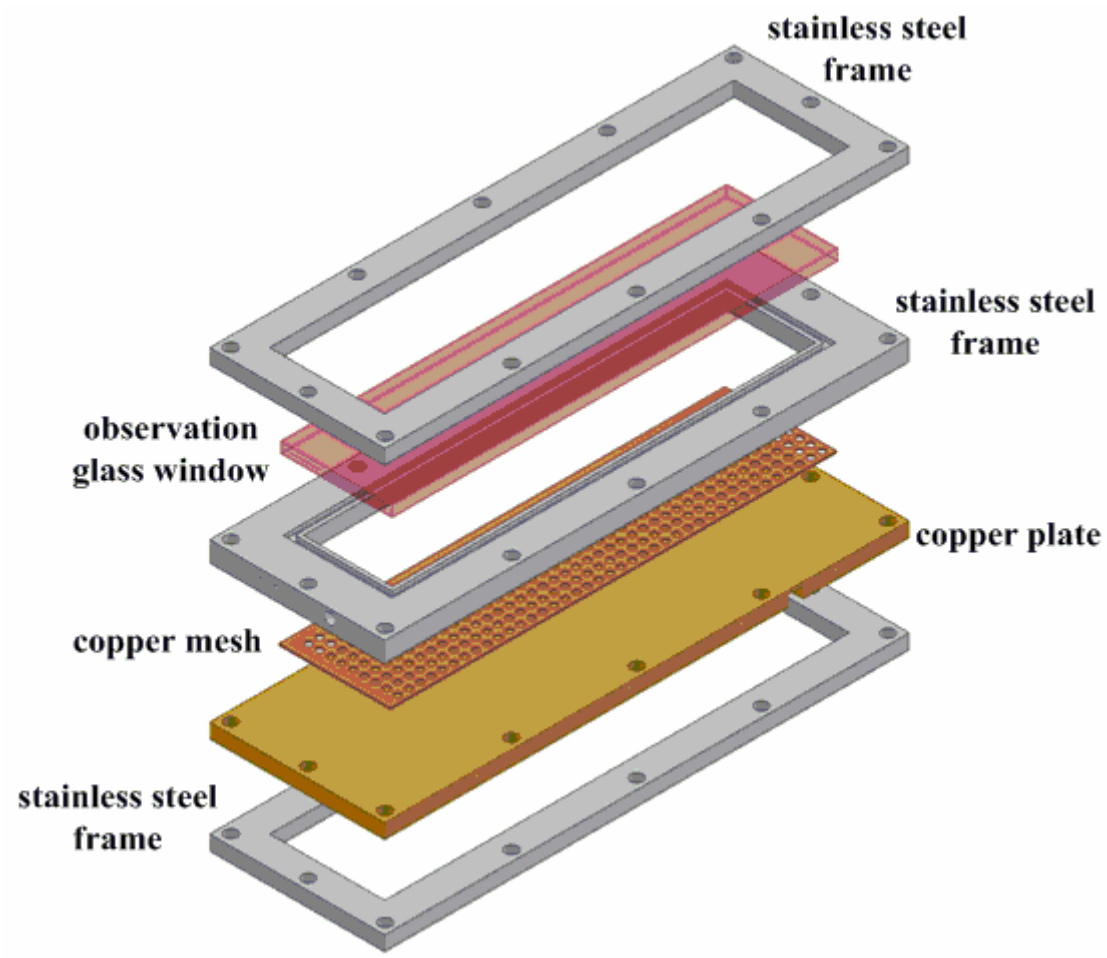

圖 3.5 可視化平板熱管設計圖

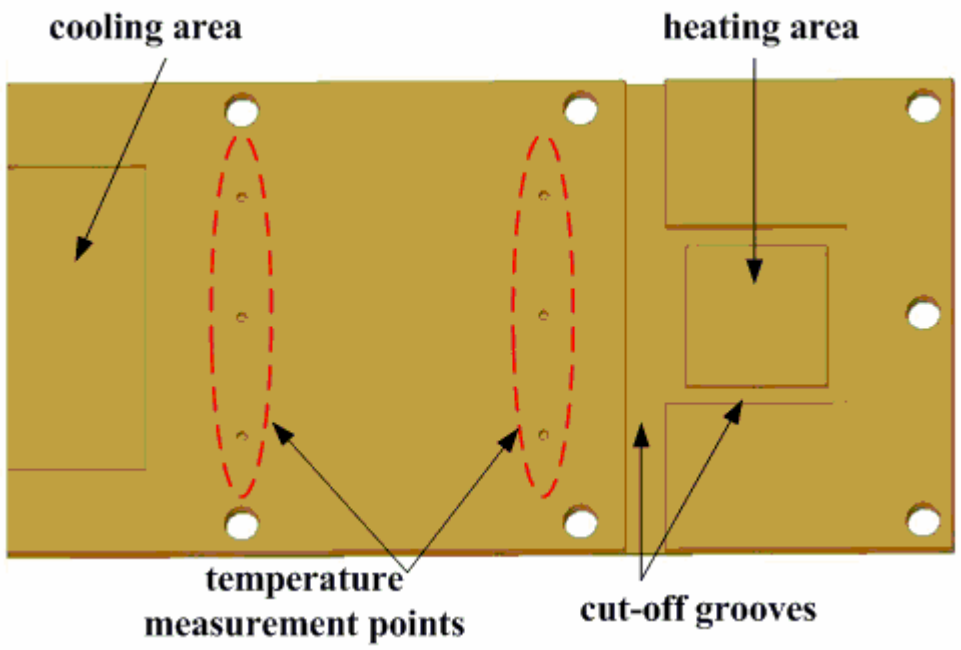

圖 3.6 熱損失百分比溫度量測點

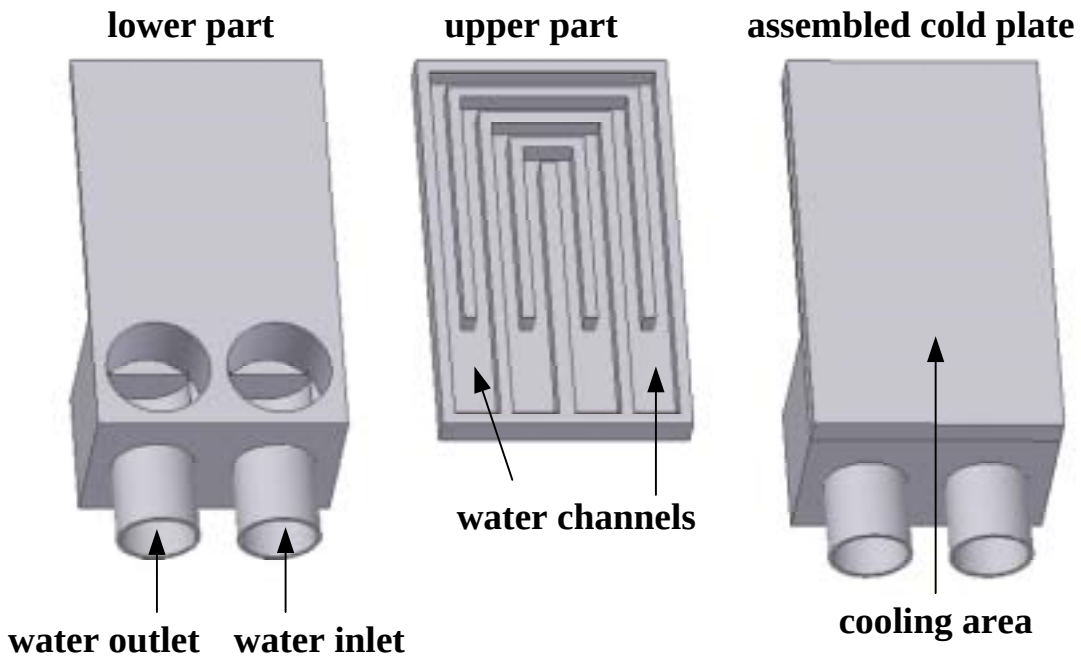

圖 3.7 鋁合金冷板設計圖

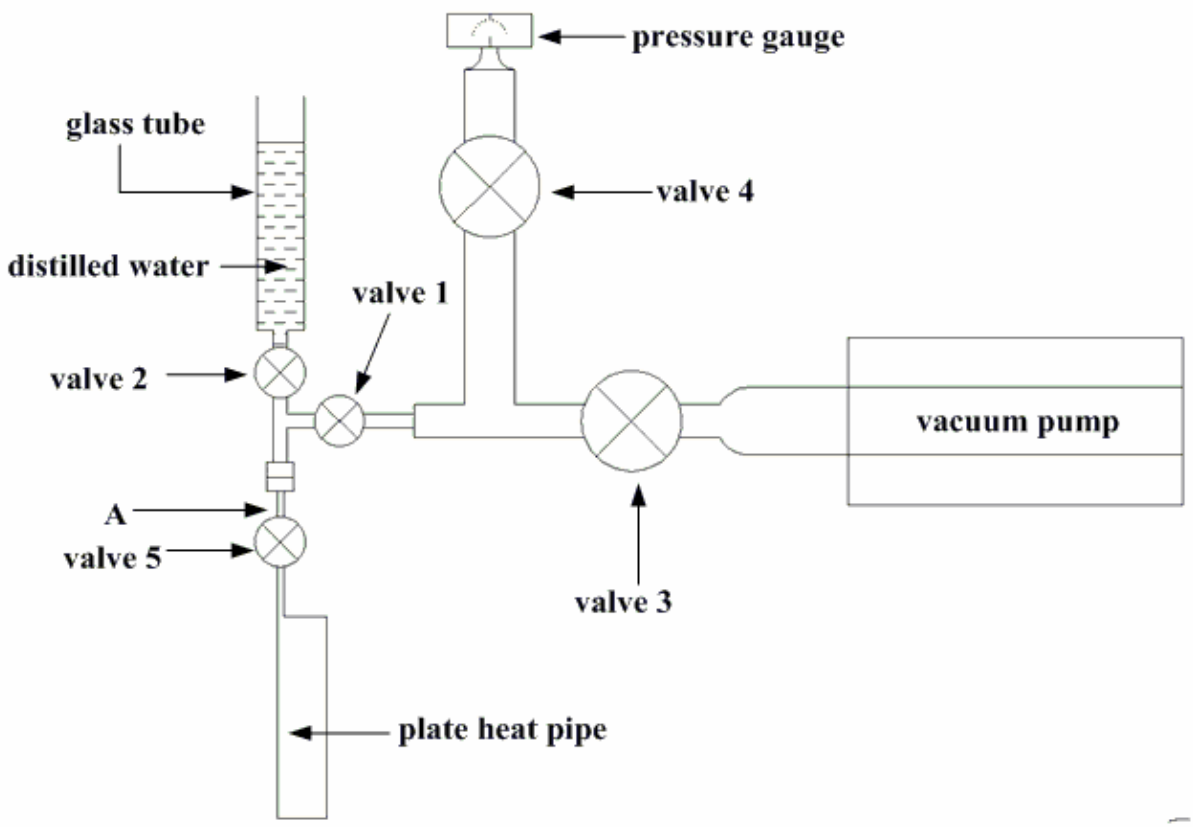

圖 3.8 注水設備示意圖

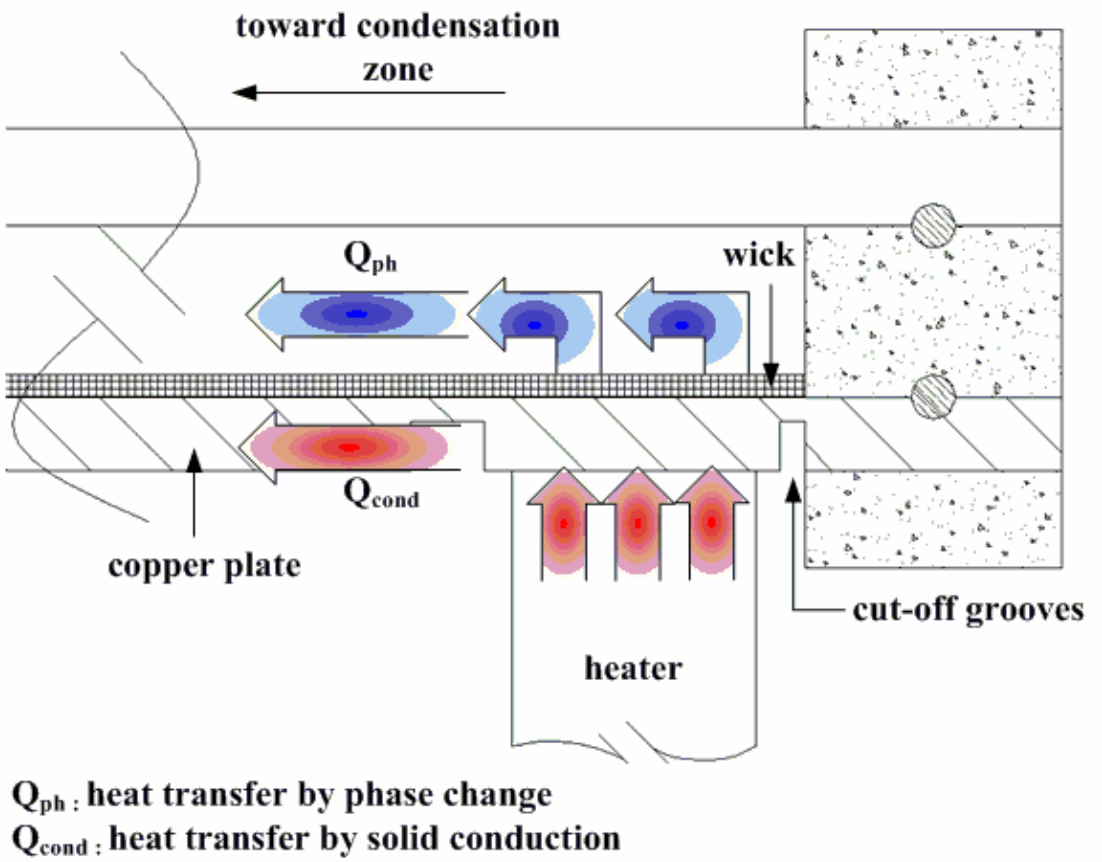

圖 3.9 蒸發區熱傳路徑示意圖