

32. 均熱板製程開發之研究

蘇程裕、褚伊銘
國立台北科技大學機電整合研究所

摘要

本研究擬利用兩相熱傳原理，改善冷凝區微結構，分析微結構製程參數探討對均熱板性能的影響。首先分別使用機械加工溝槽、噴砂、噴鋸(銅)等表面粗化方式用於均熱板冷凝區，並探討微結構性能參數(表面形貌、粗糙度、潤濕性)之關係，藉由研究結果選擇製作均熱板冷凝微結構，並對均熱板性能(熱阻)進行分析量測。

文中於均熱板的熱阻探討中發現潤濕性對微結構有相關影響，疏水性的表面熱阻低於親水性表面與具吸附流體的網目結構，且對於冷凝區無毛細結構並不影響均熱板的使用角度。

關鍵字：冷凝區、表面粗化、潤濕性

一、前言

1942年R. S. Gaugler [1] 發表首篇有關熱管的文獻，到1963年G. M.Grover [2] 所申請的專利中才首度使用「heat pipe (熱管)」一詞，熱管最初被應用於太空技術上的元件散熱、衛星向光面和背光面的熱均衡。之後熱管技術越來越成熟，漸漸符合一般市面上發熱元件之散熱要求，在1996年，美國RCA公司首先將熱管商品化，從此熱管才廣泛的應用於工業上[3]。

隨著電子科技的進步，隨著半導體產業技術不斷的往高性能化、高功率化以及輕薄短小化的方向發展，IC元件運作產生的熱度及集中度提高，散熱問題已經是電子相關產品一個無可避免的衍生問題，使用風扇及鋁擠型的散熱鰭片已漸漸無法解決熱的影響。溫度的影響程度更加明顯，當電子元件或裝置系統功能提升所造成的熱負荷越來越高時，其累積的能量將使元件之工作溫度增加，相對的會嚴重影響產品的使用壽命與可靠度。2002年，Y. Avenas[4]等人提出以平板式熱管作為均熱片，和傳統散熱鰭片相比，它具有反應時間快、均溫性佳、重量輕及效率好等優點。均熱板應用與熱管相同理論的兩相流概念與毛細結構，解決熱點集中的現象。目前微流道的選擇上較常見的有槽溝、網目與燒結三種[3]，

本研究主要是針對上蓋微結構研製，利用不同的製程方式改善現今最常見的網目結構。將微流道製作於已成型的上下蓋銅片上，利用擴散接合[4、5]

將上下蓋接合後，注水抽真空後封口。對微結構的製作探討微結構的製程差異對均熱板熱阻之影響，在性能檢測作一系列研究探討以增進均熱板的傳導效能。

二、實驗方法

2.1 毛細結構

本研究是以機械加工溝槽、噴砂、噴鋸(銅)等方式用於均熱板冷凝區，研究冷凝區微結構對均熱板熱性能之影響。均熱板的製作主要可由毛細結構、容器及工作流體三個部份討論，蒸發區毛細結構皆使用銅網燒結的方式製作，冷凝區毛細結構利用不同加工方式製作不同孔隙結構，透過孔隙率與潤濕性的分析來選擇加工參數；由於銅具有高熱傳導性、價格較低與方便加工等特性，故容器採用無氧銅製作，工作流體選擇使用具高表面張力、高潛熱與操作溫度範圍廣的純水。

本研究分別使用CNC銑床、噴砂機和熔射系統進行微結構製作。溝槽型以90°的中心鑽加工出兩種流道型式與控制溝槽深度而改變的寬度、密度；噴砂則以氧化鋁砂與玻璃砂在相同壓力與時間下粗化；噴鋸方式利用不同的噴射壓力控制成型銅粉的粒徑與孔徑大小。

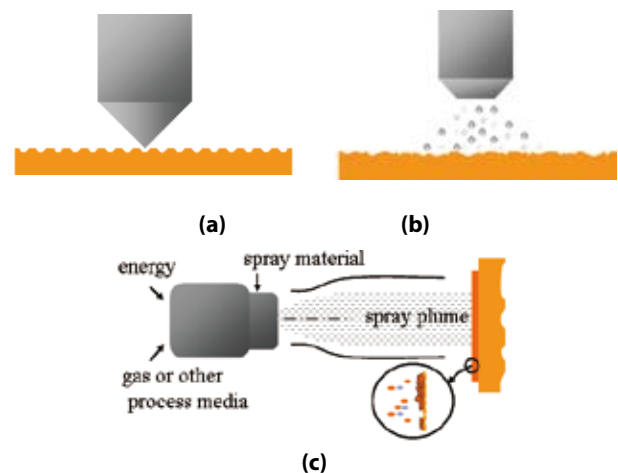


圖1 不同微結構加工示意圖
(a)機械加工、(b)噴砂、(c)噴鋸

2.1.1 潤濕性

潤濕性是利用，來分析固體表面與液體的宏觀相互作用表現，欲使冷凝後的液體在微結構上有良好的附著性與流動性，液體必須在冷凝區表面上產生最小接觸角，方能有最大的潤濕性。圖2.1為液/固相接觸示意圖，其中 θ 稱為潤濕角，若 θ 大於 90° 時，則液體無法在基材表面上伸展，表示液體無法潤濕固體表面， θ 越小則潤濕性越好。潤濕性的好壞取決於液體滴落在試片上的表面張力，其液體與固體間的夾角大小之間的關係滿足Young's equation(1805)，式(1)[6]

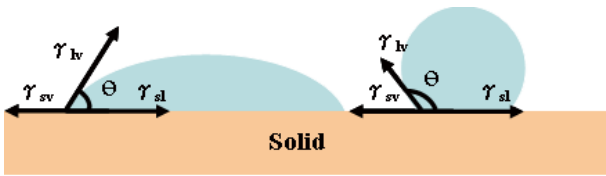


圖1 液/固接觸面示意圖[7]

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (1)$$

以精密儀器對加工表面進行量測，即可發現加工表面上有凹凸不平的痕跡，加工表面的幾何形狀是由形狀、波紋與粗糙度等表面特性組成。而粗糙度(Roughness)是利用探針在工件表面移動，經表面粗糙量測儀放大後，濾除形狀與波紋，因實際加工所引起的不規則表面的表面品質指標。表面粗糙度的表示方式有許多種而中心線平均粗糙度(Ra)是最常用的，其定義為在樣本長度內量測點距離中心線偏差之算術平均值，式(2)為其求法。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N} \quad (2)$$

2.2 均熱板

2.2.1 微結構製作

均熱板微結構分別為上、下蓋兩部份。下蓋選擇銅網作為微結構，而上蓋選擇機械加工溝槽、噴砂、噴鋅等的加工參數進行微結構製作，加工完成後的上、下蓋使用熱壓爐(Hot Press Furnace)進行擴散接合，爐內真空度達 10^{-4} torr。

2.2.2 均熱板製作

首先將銅板沖壓成型為預定尺寸，並製作上、下蓋之微結構後，再進行上下蓋之擴散接合，之後使用高週波設備在預留注水口銲接上細銅管，以供後面抽氣注水使用，待填充至計算後之預計水量即以壓力剪封閉注水用細銅管，確認充填水量，再以熔鋅方式封口確保容器內之真空度，均熱板即製造完成。

均熱板分別表示為vccm-t10-c2(縱橫交錯型溝槽)、vccm-t10-r2(放射型溝槽)、vccb-t10-a155(氧化鋁砂噴砂)、vccb-t10-g155(玻璃砂噴砂)、vccs-t10-c20(噴鋅微結構)，以相同的下蓋微結構為基礎來評估不同的上蓋製程加工後對均熱板性能之影響。在均熱板熱性能測試方面，分別改變熱源功率設定110、130與150W，作為均熱板熱阻的量測。測試設備構造圖如圖2所示，熱源使用瑞領公司LW9053 thermal impedance tester，熱源面積為 $30 \times 30 \text{mm}^2$ 。熱源藉由內部銅棒兩點溫差來計算熱傳量與熱源和均熱板接觸面的溫度，固態物質的熱傳導可由方程式(3)來表示，熱傳量為兩點之間的溫差乘以熱傳導率 and 受熱面積，再除以兩點間的距離。此熱源使用銅棒作熱傳導，熱傳面積則為銅棒截面積，熱傳距離則為 T_u 、 T_l 兩點間的距離。所以此熱源依據製造商的說明可用方程式(4)計算熱量，並可用方程式(5)計算 T_c 的溫度值，以及方程式(6)來計算熱阻R。

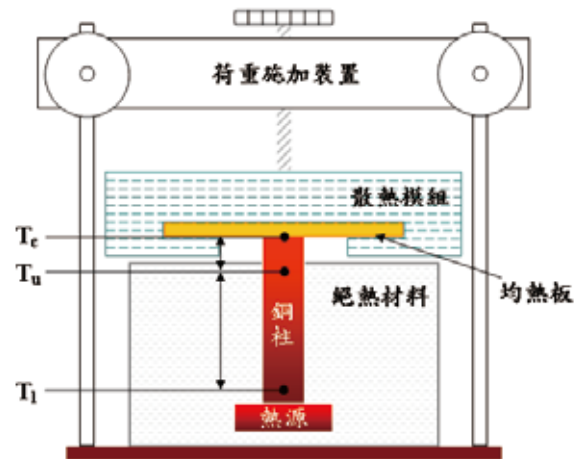


圖2 熱阻測試設備示意圖

固態物質熱傳導方程式：

$$\Delta Q = \frac{KA}{L} \Delta T \quad (3)$$

K為固態物質熱傳導率、A為熱傳截面積、L為熱傳距離、 ΔT 為溫差。

$$\Delta Q = 5.2855(T_l - T_u) \quad (4)$$

$$T_c = T_u - (T_l - T_c) / 14 \quad (5)$$

$$R = \frac{(T_c - T_e)}{\Delta Q} \quad (6)$$

T_e 為環境溫度。

將預測試的均熱板與熱阻測試設備架設好後，即可進行熱阻的量測，先設定恆溫水槽溫度為30°C，將冷卻水流量控制約為300g/min，待達到各點溫度穩定後，並施加一固定荷重，以確保散熱模組能發揮作用，即開始實驗。

三、結果與討論

3.1 毛細結構

圖1為經過機械、噴砂、噴鋅加工過後的冷凝區微結構影像，由於vccm-t10-c2、vccm-t10-r2是使用CNC銑床切削成型，為產生限制液體流動方向，故加工深度較大較明顯；噴砂vccb-t10-a155、vccb-t10-g155分別使用氧化鋁與玻璃砂加工，由於兩者的硬度與形狀皆有所不同，所以撞擊過後的表面形貌也有所不同，同噴射壓力下由於氧化鋁砂是多角型的形狀，所造成的起伏較明顯，可於圖1(c)看出其表面有如被許多尖角撞擊過後的痕跡，而圖1(d)是使用玻璃砂作處理，與之相比就相對的平滑。也因為是以小粒徑的砂粒撞擊，凹槽並無機械加工微結構明顯；噴鋅結構vccs-t10-c20與以上兩種加工方式差別於，其非以破壞方式加工，而是增加一微結構層至基材上方，噴鋅也稱為熔射(thermal spray)，是一種厚膜製程，也是一種材料表面改質技術，在實驗中以純銅為原料，經過熔融與霧化處理後，撞擊表面，形成扁平顆粒並逐層堆疊，製作出具孔隙的微結構，其結構之表面形貌如圖1(e)所示，粒子呈扁平形的圓餅狀且堆積成為層狀組織，層狀組織中會有一些位於粒子內的小氣孔，或介於粒子間的空隙[9-13]。

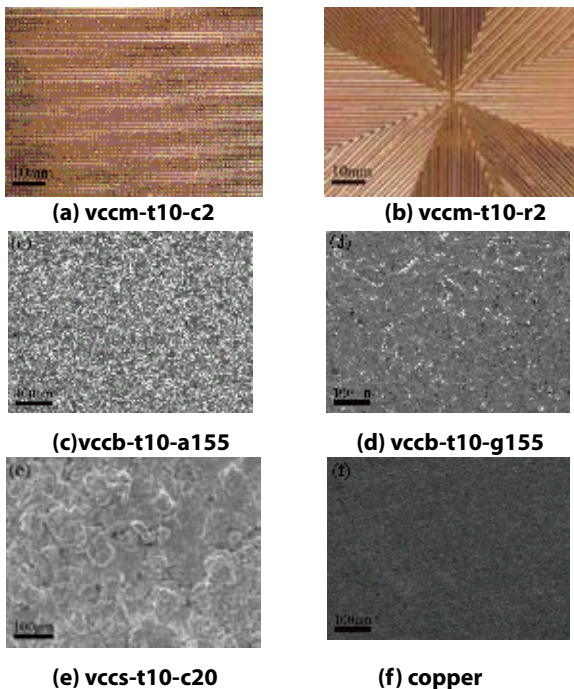


圖1不同加工方式之冷凝區微結構影像

3.1.1 不同毛細結構的影響分析

圖2為不同微結構的潤濕性影響，使用自製潤濕角量測器，在欲量測噴砂表面滴上一滴水，水量大小為0.001克，將水滴與金屬表面接觸之水滴圓弧上切線與水平面的夾角量取角度。與未加工過的銅板相比，經過氧化鋁噴砂處理後的表面幾乎無潤濕效果，疏水性更加明顯，反而是造成表面改變較少的玻璃砂表面更能使水延展開來，

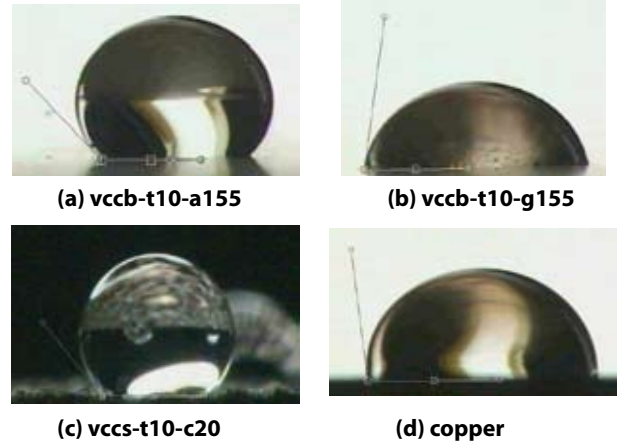


圖2

由以上潤濕角測試結果可看出除了玻璃砂衝擊結構以外，氧化鋁砂與噴鋅加工結果皆是造成表面潤濕不良(poorly wetting)。

在文獻[14-15]中提及飽和蒸汽接觸到溫度較低的表面時會發生凝結，存在兩種凝結模式，在表面潤濕好(wetting angle < 90°)時，連續冷凝下，表面有如被一層膜所包覆，稱膜狀凝結(film condensation)，此種凝結模式較為常見；而另一種是在粗糙、潤濕不良的表面上冷凝則會發生珠狀凝結(dropwise condensation)，有如裝著冰水的玻璃杯外受冷凝的水汽而形成的小水珠般。

由文獻[16]中可知道表面能與接觸面積有關，表面粗糙度造成潤濕性的好壞。表面形貌觀察可知越粗糙的表面其表面積越大。實際上表面不可能是完全平滑的，依定會有些許的起伏粗糙，所以Wenzel在1963年修正Young's equation，導出式7，可由實際接觸面積與液滴投影面積比決定接觸角(contact angle)之大小，當面越粗糙時r直越大，將使得接觸角增大，潤濕性降低。表1為潤濕角與表面粗糙度的關係，若直接對銅基材做粗化處理，如噴砂，與理論相同有粗糙度與潤濕角具正比關係，但噴鋅的增膜處理使其表面性質已與原本不同，如圖1(e)所示，表面有如顆粒堆疊，表面粗糙度的高低落差也較大(Rm=82.3μm)，且坑(cavity)的複雜性相對於噴砂等直接粗化大上許多，故無法以理論公式的正比趨勢判斷噴鋅表面的潤濕角大小，但以實際實驗觀察結果顯示，噴鋅的表面一樣是屬於疏水性(contact angle > 90°)表面。

$$\Delta Q = 5.2855(T_i - T_u) \quad (7)$$

表1

	氧化鋁砂	玻璃砂	噴鋅
潤濕角	133.5°	81.5°	130°
粗糙度(Ra)	0.91μm	0.74μm	11.8μm

3.2 均熱板性能

均熱板與熱管工作原理與用途差異不大，目的均是希望將熱量帶離工件並由散熱模組藉以冷卻，故熱管與均熱板的性能評價通常使用最大熱傳量 Q_{max} 及熱阻 $R(^{\circ}C/W)$ 為依據。最大熱傳量越高及熱阻越小的均熱板效能越佳。

3.2.1 熱阻

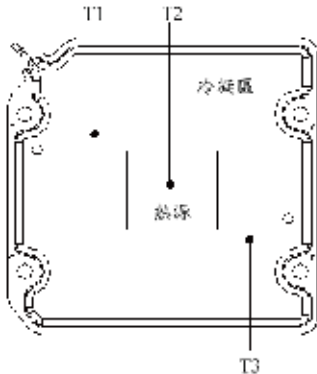


圖5 熱阻量測位置圖。

實驗設定恆溫水槽溫度為 $24.5^{\circ}C$ 、冷卻水流量控制為 $300g/min$ ，各點溫度穩定後即開始實驗。改變熱源功率，分別於電源供應器設定 110 、 130 和 150 三段加熱功率，熱源面積為 $30mm \times 30mm$ ，針對冷卻水入口 $T1$ 、熱源上方 $T2$ 和冷卻水出口 $T3$ 三個區域進行溫度的量測，如圖5所示，並以熱源溫度與冷凝水套的溫度差所計算的總熱阻 Ta 作為比較依據。圖6分別為溝槽、噴砂與噴鋅三種加工方式的五種冷凝區微結構型態實際加熱功率與熱阻之關係圖。由加熱功率與各點熱阻可以初步判斷均熱板的優劣，實驗中可發現熱阻隨加熱功率的增加而降低。

圖6(a)中，是現今市面上最常看到的銅網微結構的均熱板熱傳-熱阻測試結果，在 $110W$ 的加熱功率下最低熱阻為 $T1$ 的 $0.147^{\circ}C/W$ ，最低點發生於加熱功率 $150W$ 時 $T3$ 的 $0.124^{\circ}C/W$ ，而總熱阻最高為 $110W$ 下 $0.246^{\circ}C/W$ ，最低 $150W$ 的 $0.233^{\circ}C/W$ ，以上數據為此時實驗的對照組。

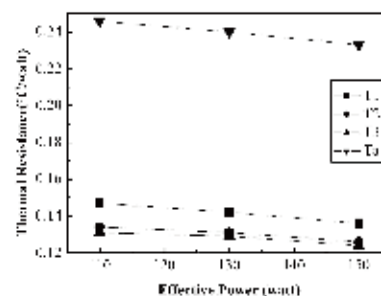
圖6(b)、(c)中顯示出 $vccm-t10-c2$ 與 $vccm-t10-r2$ 捷隨著功率增加而熱阻降低。 $vccm-t10-c2$ 的最高熱阻發生在 $T1/110W$ 的 $0.168^{\circ}C/W$ ，最低熱阻在

$T2/150W$ 的 $0.136^{\circ}C/W$ ，而 $vccm-t10-r2$ 的最高熱阻發生在 $T1/110W$ 的 $0.151^{\circ}C/W$ ，最低熱阻在 $T2/150W$ 的 $0.131^{\circ}C/W$ 。兩者的最高最低總熱阻分別是 $0.266^{\circ}C/W$ 、 $0.250^{\circ}C/W$ 和 $0.256^{\circ}C/W$ 、 $0.240^{\circ}C/W$ ，不管是個點的熱阻或總熱阻值皆比銅網微結構高上許多，此結果表示在冷凝區僅有用溝槽限定水流行進方向對均熱板的效能提升並無作用。

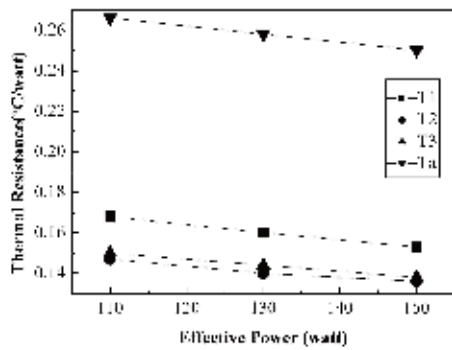
圖6(d)、(e)比較了兩種不同砂種造成的表面形貌所帶來的結果，使用氧化鋁砂的 $vccb-t10-a155$ 使冷凝銅板呈現疏水特性，而玻璃砂的 $vccb-t10-g155$ 造成表面更為親水。 $vccb-t10-a15$ 最高熱阻發生在 $T1/110W$ 的 $0.222^{\circ}C/W$ ，最低熱阻在 $T2/150W$ 的 $0.188^{\circ}C/W$ ，最高最低總熱阻分別是 $0.318^{\circ}C/W$ 、 $0.308^{\circ}C/W$ ， $vccb-t10-g155$ 最高熱阻發生在 $T1/110W$ 的 $0.233^{\circ}C/W$ ，最低熱阻在 $T2/150W$ 的 $0.205^{\circ}C/W$ ，最高最低總熱阻分別是 $0.339^{\circ}C/W$ 、 $0.326^{\circ}C/W$ ，此兩組結果皆無憂於銅網與機械加工方式的效能。

圖6(f) $vccs-t10-c20$ 是使用噴鋅方式增加一層銅顆粒堆疊的粗糙面，由圖2(c)可看出此粗糙面也是使得銅板面的疏水的結果。此種微結構使均熱板整體效能提升到最高熱阻發生在 $T1/110W$ 的 $0.109^{\circ}C/W$ ，最低熱阻在 $T3/150W$ 的 $0.078^{\circ}C/W$ ，最高最低總熱阻分別是 $0.209^{\circ}C/W$ 、 $0.196^{\circ}C/W$ ，次測試結果是所有實驗與對照組中效能表現最好的。

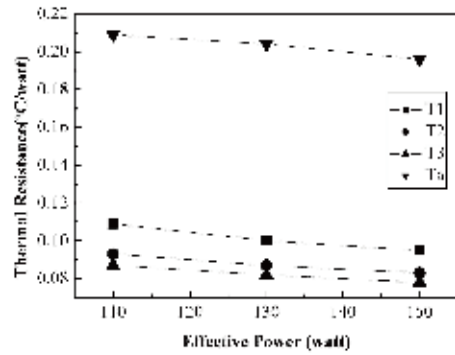
從結果來看只以溝槽疏通流體並未到達取代銅網微結構的效能標準，噴砂粗化的方式也是如此，但是從噴砂結果中單以粗化造成的影響作比較，親水性與疏水性的表面對均熱板的影響。若以最初粗化目的來探討，預估以粗化結構能取代銅網吸附冷凝後的工作流體，故以親水性的結構為佳，但結果卻與之相反，反而疏水性的表面效能較為優越。在探討冷凝的文獻中[14-15]提及到飽和蒸汽接觸親水性的表面冷凝會形成一類似層流水層，但此水層卻成為阻礙蒸氣冷凝的一熱阻層，但疏水表面因為珠狀凝結使得部分表面不會被流體覆蓋，蒸汽可直接與熱傳導較好的銅基材接觸，如圖7所示，圖中的水珠有如一阻礙熱行進的阻擋物，水珠越大熱阻也越大($k_{water}=0.613 W/m \cdot K$)，最低熱阻發生在無任何水珠，蒸汽可直接與冷凝銅板接觸的區域($k_{copper}=401 W/m \cdot K$)。



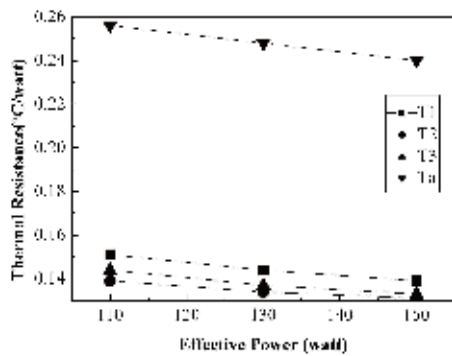
(a) copper-net



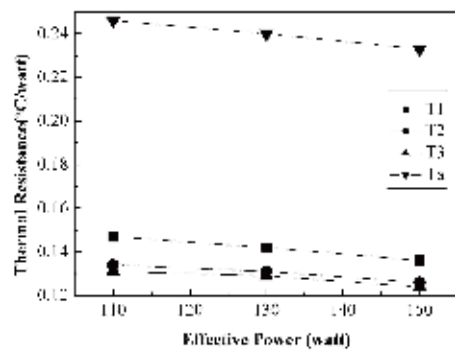
(b) vccm-t10-c2



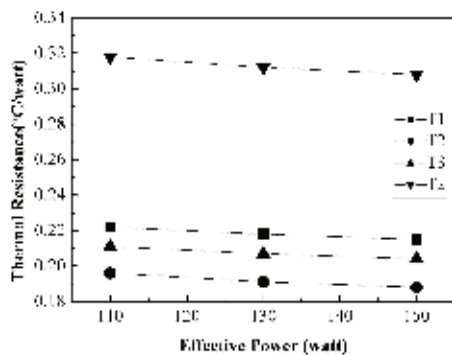
(f) vccs-t10-c20



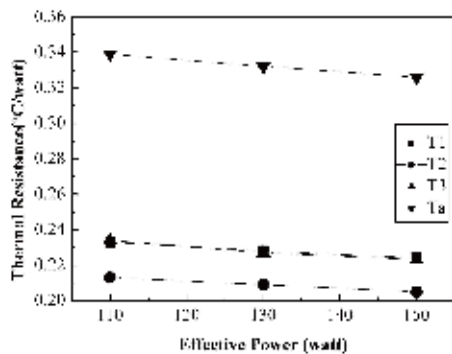
(c) vccm-t10-r2



(f) vccs-t10-c20



(d) vccb-t10-a155



(e) vccb-t10-g155

圖6 熱傳量-熱阻圖(a) 銅網微結構、(b) vccm-t10-c2、(c) vccm-t10-r2、(d) vccb-t10-a155、(e) vccb-t10-g155與(f) vccs-t10-c20

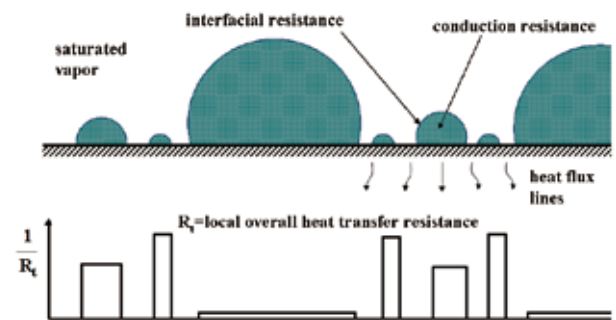


圖7 珠狀凝結熱阻示意圖[15]

3.2.1 均熱板位置關係

不同微結構組織的均熱板性能表現如圖8所示之熱傳量-熱阻關係曲線，橫座標為熱傳量、縱座標為熱阻。不同微結構組織的均熱板均有一定相同趨勢，即熱傳輸量越大時熱阻越小。另外由圖8中的垂直量測與倒立量測可發現，除了噴砂微結構以外，熱源溫度與熱阻幾乎沒有受到角度改變產生變化，代表複合式微結構均熱板不受重力影響。噴砂微結構在垂直擺放時熱阻最低，而倒立擺放時熱阻最

高，其原因在於無毛細力的上蓋微結構對於珠狀的冷凝液滴較易受重力影響，垂直擺放可使冷凝銅板上的液滴藉由重力加快移動，使蒸汽更能接觸熱阻低的銅板；而倒立狀態就無造成液滴堆積於冷凝區域提高了熱阻。而噴鋸微結構在冷凝區可以提升平板式熱管之熱性能，並確保在高熱傳量下任意角度之使用。

圖8所示，垂直傾斜角最低的熱阻值發生在由噴鋸微結構所製成的均熱板，值為 $0.197^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；倒立傾斜角最低熱阻也是噴鋸微結構的 $0.178^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，此兩項結果皆可證明冷凝區使用噴鋸微結構在任何角度下皆能有優於網目結構的效能。

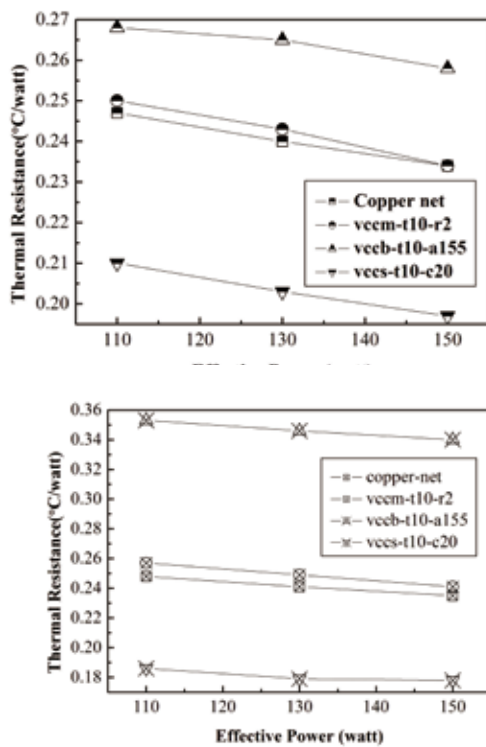


圖8 不同微結構熱傳量與系統熱阻之關係 (a) 垂直傾斜角、(b) 倒立傾斜角

四、結論

本研究可利用較簡單、省時的噴塗與噴砂方式，製作冷凝區之毛細構造，使用自動化製程達到比傳統燒結方式更省成本的目的。

以不同參數製作均熱板冷凝區內部毛細結構，針對毛細結構性質(表面形貌、粗糙度、潤濕性)進行探討，進而對均熱板進行熱阻量測。研究結果顯示，溝槽疏通流體與噴砂粗化並未到達取代銅網微結構的效能標準，但是發現冷凝表面的潤濕性好壞對冷凝的熱阻有所相關，潤濕性差(疏水性)而形成的珠狀冷凝使得部分表面不會被流體覆蓋，蒸汽可直接與熱傳導較好的銅基材接觸，降低了熱阻。在製成均熱板的性能部份，熱阻的表現整體來看vccs-

t10-c20表現最佳，最低熱阻僅 $0.078^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，最低總熱阻也只有 $0.178^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，且在任何角度下皆有良好的性能表現，證明能以自動化噴塗與噴砂製程取代以人力放置燒結方式。

參考文獻

1. R.S. Gaugler, "Heat Transfer Device", U.S. Patent NO.2350348, 1944.
2. G.M. Grover, "U.S. Patent NO.3229759", 1963.
3. 日本熱管技術協會，依日光譯，「熱導管技術理論實務」，1986。
4. 莊東漢，擴散接合技術探討，機械月刊，21·12·1995·198-209。
5. 張桂木、王景龍，瀋陽航空工業學院學報，14·4·1997。
6. Edward Bormashenko, "Young, Boruvka-Neumann, Wenzel and Cassie-Baxter equations as the transversality conditions for the variational problem of wetting," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 345 (2009) 163-16
7. A. C. Mackie, "Reflow Atmospheres in the Lead-free Era," Circuits Assembly, March 2003.
8. 范光照、張郭益，精密量測，高立圖書有限公司。
9. R.W. Smith, and R. Knight, "Thermal Spraying 2 Recent Advances in Thermal Spray Farming," JOM-Journal Of The Minerals & Materials Society, vol. 48, Issue (4), 1996, pp.16-19.
10. R. Walker and B. Barnes, "High-Velocity oxygen fuel Spray Coatings for Reclamation," Materials & Design, vol. 48, Issue (6), 1994, pp.323-329.
11. E.R. Sampson, "Thermal Spray Coatings for Corrosion Protection: An Overview," MP, 1997, pp.27-30.
12. B. Fitzsimons, "Thermal Spray Coatings for Corrosion Protection," Corrosion Management, Dec 1995/Jan 1996, pp.12-17.
13. 張家華，金屬熔射/電鑄複合製模技術，碩士論文，國立台北科技大學製造科技研究所，台北，民國92年7月。
14. Van P. Carey, Liquid Vapor Phase Change Phenomena, Taylor and Francis.

15. Karl Stephan, Heat Transfer in Condensation and Boiling, Springer-Verlag.
16. R. N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, Ind. Eng. Chem. 28 (1936) 988-994

Study on the Performance of Vapor Chamber in the Wick of Condensation Zone

Cherng-Yuh Su 、 Yi-Ming Chu
Graduate institute of Mechatronic Engineering
National Taipei University of Technology

Abstract

Based on the principle of two-phase heat transfer, improved the wick of condensation. Besides, the performance of the vapor chambers was also discussed in different wick fabricated in this research. At first, the surface roughness of condensation of vapor chamber was processed by CNC 、 sand blasting and thermal spray. The property of wick , including surface structures 、 roughness and wetting angle were discussed. According to the result of studying, the wick in vapor chambers was fabricated and analyzed the vapor chamber performance, involving heat resistance and slope of position.

Factors affecting wetness in wicks, heat resistance of hydrophobic surface is lower than hydrophilic surface and the wick of mesh, which can absorb liquid, in the discussion of heat resistance. In the aspect of slope of vapor chamber in operation, non-capillary in condensation zone were not influence.

Keywords : Vapor Chamber 、 Condensation Zone 、 Surface roughening 、 wetting angle