

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

發泡金屬散熱鰭片在自然對流條件下
之熱傳性能

**Performance of Metal Foam Heat Sink under
Natural Convection**

研究生：何彥慶

指導教授：王啟川 博士

中 華 民 國 一 〇 一 年 七 月

發泡金屬散熱鰭片在自然對流條件下之熱傳性能

Performance of Metal Foam Heat Sink under Natural Convection

研 究 生：何彥慶

Student：Yan-Ching Ho

指導教授：王啟川

Advisor：Chi-Chuan Wang



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

摘要

本論文為以實驗方法探討在自然對流條件下發泡金屬應用於傳統散熱鰭片上之熱傳性能。實驗採用不同孔數率(PPI)與厚度的發泡銅，以燒結的方式固定在銅底板上製成發泡金屬散熱鰭片，本實驗主要測試散熱鰭片樣本有三組，並且探討鰭片在水平與垂直角度下的熱傳性能。最後探討熱輻射效應，比較有無黑體漆對熱傳的影響。

第一組實驗在固定鰭片總厚度條件下，觀察三種不同發泡金屬厚度與孔數率樣本之熱傳性能。6+4mm,50PPI 樣本的熱傳係數最高，較 10mm 平板高約 6.6%，再來是 9+1mm,50PPI，較 10mm 平板高約 3.5%。

第二組實驗樣本為在底板表面洗溝槽，在溝槽內燒結 1mm,50PPI 的發泡銅，實驗參數為改變溝槽間隙寬度。不管在水平與垂直角度下，表面全發泡樣本的熱傳係數較高。

第三組實驗做相同底板燒結不同厚度與孔數率的發泡金屬實驗結果顯示，角度對熱傳性能的影響特別顯著，鰭片垂直縱向擺放與水平擺放有較高的熱傳係數，垂直橫向擺放的熱傳係數較低。

Abstract

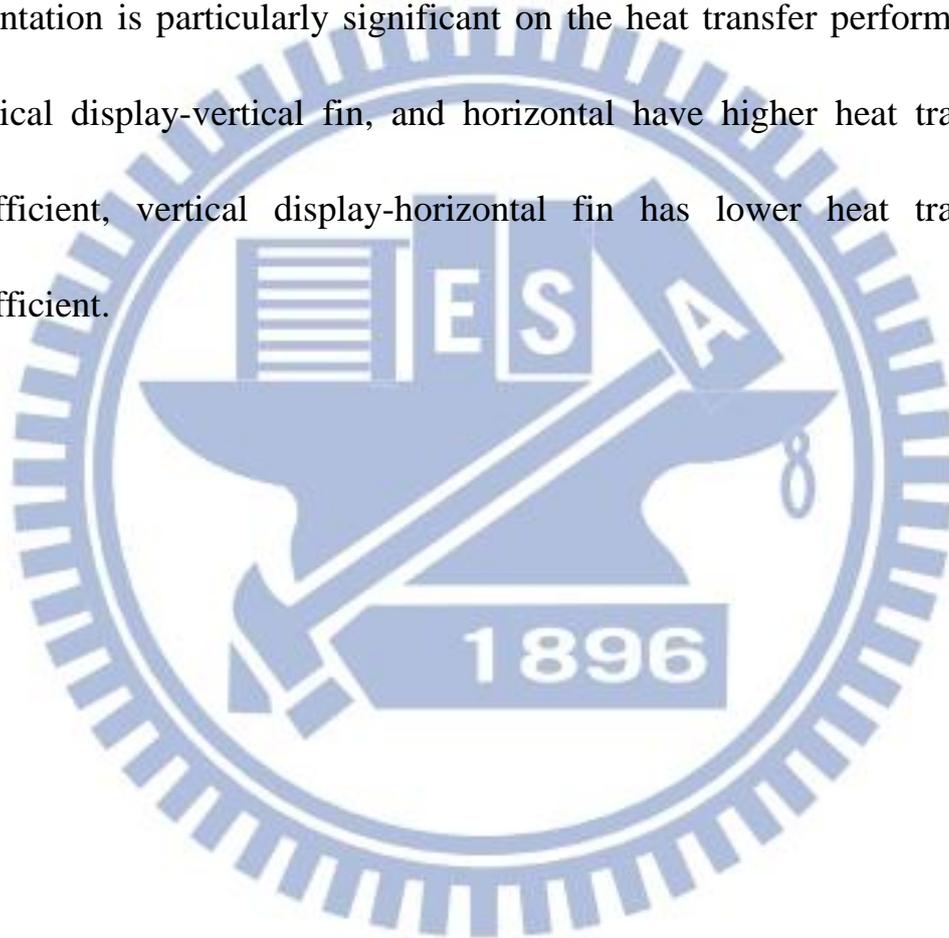
This thesis is an experimental investigation of the heat transfer performance of metal foam used in traditional heat sink under natural convection. Experiment use different PPI and thickness of the copper foam, sintering metal foam heat sink on copper base plate, and this experiment to test heat sink three groups of samples, and explore the fins in heat transfer performance of horizontal and vertical angles. Finally, we discuss the effect of heat radiation, and comparison with or without black body paint on the heat transfer.

The first set of experiments fixed the fin thickness, observed the heat transfer performance of metal foam with three different thickness and PPI, 6+4 mm,50PPI sample has the highest heat transfer coefficient, heat transfer coefficient for 6+4 mm,50PPI sample is better than 10mm flat plate by 6.6%, again 9+1 mm,50PPI sample is better than 10mm flat plate by 3.5%.

The second set of experiments sample has groove in the base plate surface, and sintering 1mm,50PPI copper foam in the groove, the experimental parameters is to change the width of the groove gap.

Regardless of the horizontal and vertical angles, surface all metal foam sample has the highest heat transfer coefficient.

The third set of experiments is sintering different thickness and PPI metal foam on the same base plate, experimental results show that the orientation is particularly significant on the heat transfer performance, vertical display-vertical fin, and horizontal have higher heat transfer coefficient, vertical display-horizontal fin has lower heat transfer coefficient.



致謝

兩年的碩士生涯中，首先要感謝的是我的指導老師王啟川博士，提供充裕的實驗資源，並從老師身上學到做研究應有的態度，讓我獲益良多；另外也要感謝工研院楊愷祥博士，時常在討論之中給我許多寶貴的建議以及看法。感謝傅武雄博士擔任口試主持人以及口試委員楊建裕博士提出許多重要意見，讓我的論文更加完善。

也要謝謝在剛進實驗室時，已畢業碩士班耕瑋、仁聰學長對於我實驗操作的教導與解惑，還有書磊學長同我討論實驗所遭遇到的問題。同時還要感謝交大機械 305：坤穎、仁傑、佩如、美佐、維仁；508：昆壕、楷翔；513：保哥、士哲、瑋亭、立竹、洋嘉、偉博；550：冠宇、靖瑞、泳彤、柏豪、善豪、宇棋；碩一的宥澄、建宏、慧敏、宜群以及碩零的博元、宗瀚，為我這一年的生活增色了不少。另外還要感謝我在新竹的球友：國瑋、大英、惠君、小強、瑋芸、湯姆熊、黑吉、耘在、小胖、巧巧，謝謝你們陪伴的日子！

最後，我要感謝我的家人在我求學路上的陪伴支持，有你們在背後默默的支持與付出，我才能順利完成學業。

何彥慶

2012.7 交大工五 305

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
符號說明.....	x
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 多孔性散熱鰭片介紹.....	2
1-2-1 多孔性介質的定義.....	2
1-2-2 多孔性介質的分類.....	2
1-2-3 多孔性介質的應用.....	3
1-2-4 多孔性散熱鰭片的構造與特性.....	3
1-3 發泡金屬的介紹.....	7
1-3-1 發泡金屬的定義.....	7
1-3-2 發泡金屬的結構特徵.....	7

1-3-3 發泡金屬的分類.....	8
1-3-4 發泡金屬的製作.....	9
1-3-5 發泡金屬強化熱傳的作用原理.....	11
1-4 常見散熱方式簡介.....	12
1-5 自然對流介紹.....	15
1-5-1 自然對流之基本原理.....	15
1-5-2 自然對流常用的無因次參數.....	15
1-6 文獻回顧.....	17
第二章 實驗設備與方法.....	21
2-1 實驗設備.....	21
2-2 儀器校正.....	23
2-2-1 熱電偶校正.....	23
2-3 實驗步驟與資料簡化.....	24
第三章 結果與討論.....	43
第四章 結論與建議.....	54
4-1 結論.....	54
4-2 建議.....	55
參考文獻.....	56

附錄、實驗誤差分析59

表目錄

表 2-1 熱電偶校正方程式38

表 2-2 第一組實驗樣本相關參數39

表 2-3 第二組實驗樣本相關參數39

表 2-4 第三組實驗樣本相關參數40

表 2-5 實驗樣本總表41



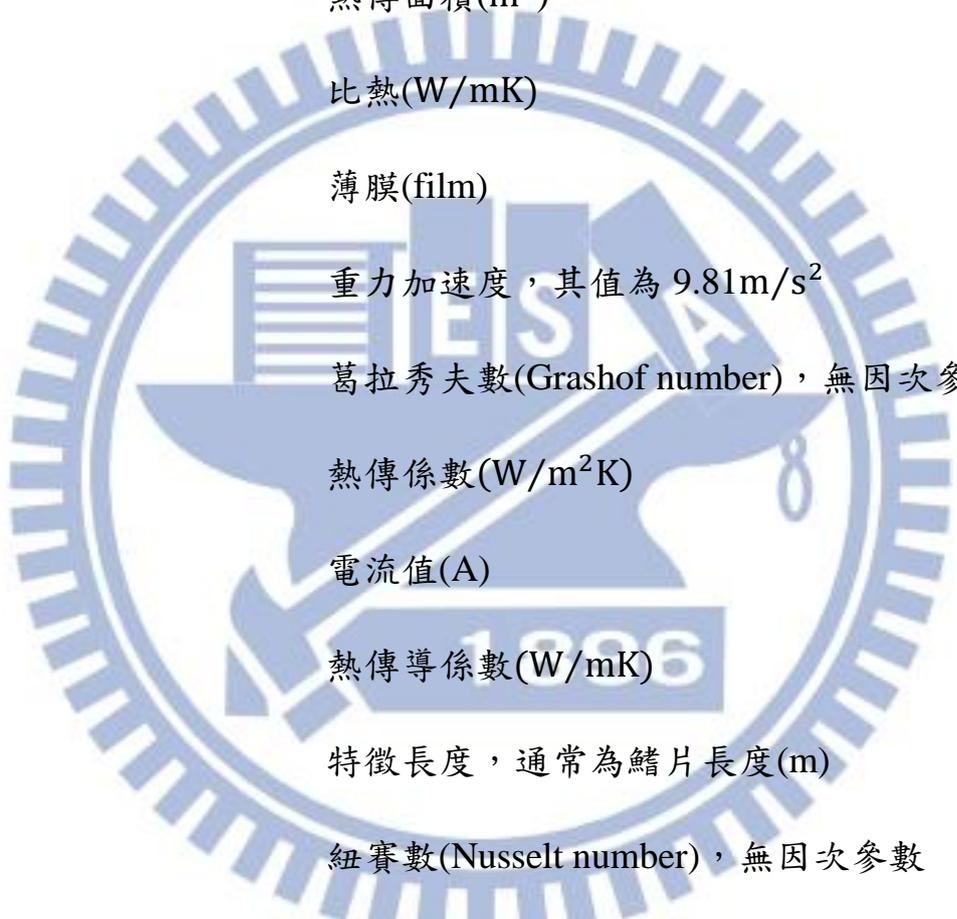
圖目錄

圖 1-1 電子設備產生故障之各項因素比例.....	4
圖 1-2 飲水機濾心	5
圖 1-3 冷氣機濾網.....	5
圖 1-4 發泡陶瓷.....	5
圖 1-5 發泡銅.....	6
圖 1-6 排汗布料.....	6
圖 1-7 多孔性散熱器.....	6
圖 2-1 自然對流實驗設備架構示意圖.....	27
圖 2-2 自然對流恆溫腔室.....	28
圖 2-3 MX100 紀錄器.....	28
圖 2-4 電源供應器.....	29
圖 2-5 功率計.....	29
圖 2-6 接觸壓力量測裝置.....	30
圖 2-7 電熱片.....	30
圖 2-8 恆溫水槽.....	31
圖 2-9 均溫銅塊.....	31
圖 2-10 T 型熱電偶.....	32

圖 2-11 標準溫度計(RTD).....	32
圖 2-12 真空斷熱板.....	33
圖 2-13 熱電偶校正方程式：線性方程式.....	33
圖 2-14 發泡銅樣本上視圖.....	34
圖 2-15 發泡銅樣本前視圖.....	34
圖 2-16 不同厚度與孔數率(PPI)發泡銅條.....	35
圖 2-17 熱電偶線量測 T_{bp} 位置(五點取平均).....	35
圖 2-19 垂直橫向與垂直縱向擺放.....	36
圖 2-20 各種樣本形式工程圖.....	37
圖 3-2 第二組實驗水平角度熱傳係數.....	50
圖 3-3 第二組實驗垂直角度熱傳係數.....	50
圖 3-7 8mm,30PPI 發泡銅樣本.....	52
圖 3-8 2mm 銅平板熱傳係數.....	53
圖 3-9 4mm 樣本熱傳係數.....	53

符號說明

英文字母符號



A	熱傳面積(m^2)
C_p	比熱(W/mK)
f	薄膜(film)
g	重力加速度，其值為 $9.81m/s^2$
Gr	葛拉秀夫數(Grashof number)，無因次參數
h	熱傳係數(W/m^2K)
I	電流值(A)
k	熱傳導係數(W/mK)
L	特徵長度，通常為鰭片長度(m)
Nu	紐賽數(Nusselt number)，無因次參數
P	加熱功率(W)
Pr	普朗特數(Prandtl number)，無因次參數
PPI	孔數率(每一英吋的平均孔洞數)
q	熱傳量(W)
R	熱阻 ($^{\circ}C/W$)

Ra	瑞理數(Rayleigh number)，無因次參數
T	溫度(°C)
V	電壓值(volt)

希臘字母

α	流體熱擴散係數(m^2/s)
β	體積熱膨脹係數，定義為 $1/T_f$ (1/K)
Δ	差值
ε	孔隙度(%)
μ	黏滯係數(kg/ms)
ν	動黏滯係數(m^2/s)

下標符號

a	環境
air	空氣
bp	底板(base plate)
loss	損失

第一章 緒論

1-1 前言

在現代的資訊社會裡，電子設備所伴演的角色愈來愈重要，電子設備功能增加的速度可說以倍數成長，所需電壓也隨之成長。根據 1964 年，哥登·摩爾(Gordon Moore)所提出摩爾定律：指一尺寸相同的晶片上，所容納的電晶體數量，因製程技術的提升，每 18 個月會加倍，性能也將提升。但晶片的容量是以電晶體的數量多寡來計算，電晶體愈多晶片執行運算的速度愈快，雖性能提高，但相對產生的熱量也大幅提高，而一般電子設備產生故障之各項因素中，有 55% 源自於溫度問題[1] (圖 1-1)，散熱問題也就更為迫切需要。若產生的熱量無法傳至外界，則電子設備在執行功能時可能會產生如當機等情形。對於使用者來說，尤其是工業生產上，是最不願意見到的一件事。發泡金屬散熱鰭片具有單位體積質量輕與單位體積表面積大等優點，使其在電子散熱領域上的應用漸漸受到注目。

1-2 多孔性散熱鰭片介紹

1-2-1 多孔性介質的定義

多孔性介質指的是由固體物質組成的骨架和由骨架分隔成大量密集成群的微小空隙構成的介質，同時具有固體與互通的空孔，使得流體(例如水或空氣)可以通過的物質或是型態。

1-2-2 多孔性介質的分類

多孔性介質有多種類型。按成因劃分，可分成天然多孔性介質和人造多孔性介質。天然多孔介質又分為地下多孔介質和生物多孔介質，前者如岩石和土壤；後者如人體和動物體內的微血管網路和組織間隙以及植物體的根、莖、枝、葉等。人造多孔性介質種類繁多，如過濾設備的濾器(如飲水機濾心，如圖 1-2 及冷氣機濾網，如圖 1-3)、鑄造沙型、磚瓦、木材等建築材料、活性炭、發泡材料(如發泡陶磁，如圖 1-4 及發泡銅，如圖 1-5)、排汗布料(如圖 1-6)、催化劑、鞍形填料和玻璃纖維等的堆積體等。

1-2-3 多孔性介質的應用

多孔性介質在工業方面的應用非常廣泛，包含如觸煤反應器、核燃料棒、石油移動、熱交換器、絕熱材料、公害防治、噪音控制、生醫材料、電子材料、電子設備散熱、蓄電池、過濾系統、火箭噴嘴、流體控制器、衝擊吸收、能量吸收、建材與交通建設、紡織布料、合金製造、整型元件、混合器等，皆有多孔性介質的應用與研究。

1-2-4 多孔性散熱鰭片的構造與特性

多孔性散熱鰭片的構造如圖1-7所示，主要由一高熱傳導係數之多孔性介質及一金屬底板所構成。本研究所使用之多孔性介質為發泡銅，底板材質為銅，利用燒結的方式黏合成一體，即成為多孔性散熱鰭片。底板底面由電熱片加熱作為模擬熱源。

多孔性散熱鰭片的構造有以下幾個特性：

- a. 單位體積質量輕
- b. 單位體積表面積大
- c. 加工相對複雜

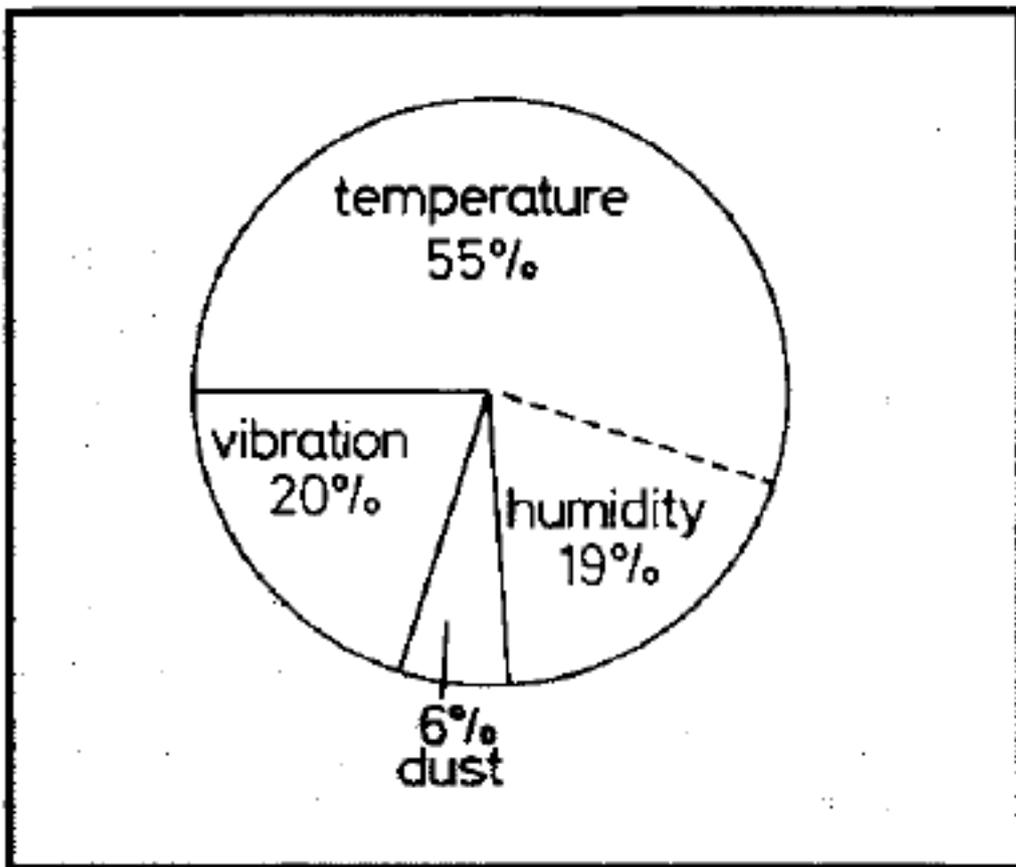


圖 1-1 電子設備產生故障之各項因素比例 [1]



圖 1-2 飲水機濾心



圖 1-3 冷氣機濾網



圖 1-4 發泡陶瓷

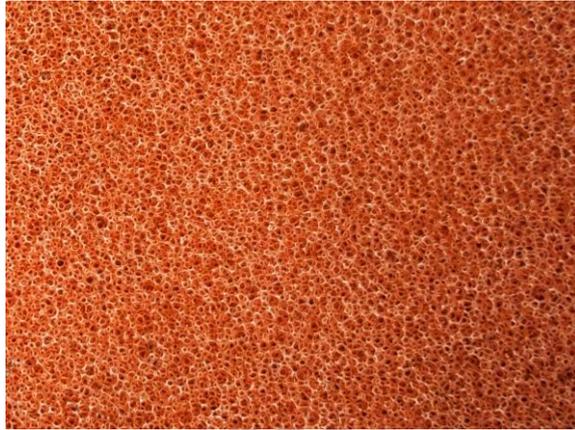


圖 1-5 發泡銅



圖 1-6 排汗布料



圖 1-7 多孔性散熱器

1-3 發泡金屬的介紹

1-3-1 發泡金屬的定義

發泡金屬一般定義為一種金屬基體中含有一定數量、一定尺寸孔徑、一定孔隙度的金屬材料。它從結構上可以分為開孔和閉孔兩種形式，前者具有連續貫通的三維多孔結構，流體可以從中間流過；後者內部氣孔相互獨立，並且每個氣孔都是封閉的。發泡金屬材料獨特的特徵結構，使它具有質輕、吸音減震、隔熱(閉孔)、散熱(開孔)、電磁屏蔽、高比強度等多功能復合特性。對於開孔發泡金屬，高孔隙度和複雜的三維立體網狀結構使它具有很好的散熱作用，高換熱效率使它在緊湊型熱交換器散熱和微電子器件冷卻中的應用具有十分廣闊的前景。

1-3-2 發泡金屬的結構特徵

描述發泡金屬結構的幾何參數有孔隙度、孔數率、孔徑、比表面積等。發泡金屬的孔隙度 ε 較高，一般隨其種類不同而不同，在 45%~98% 間變化。孔數率定義為每線性英寸上孔的數目 (PPI)。孔徑範圍一般為 0.1~10mm，透過工藝控制，還可獲得微米級的孔徑。被壓縮發泡金屬的比表面積很大，可達到 $10\sim 40\text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 。

1-3-3 發泡金屬的分類

1. 開孔發泡金屬

孔洞之間是相通的，就像是不完整、有缺口的泡泡。

2. 閉孔發泡金屬

孔洞表面是實心的，也就是每個孔洞與周圍孔洞完全隔開的。

閉孔發泡金屬可用作緩衝材料，同樣在自行車頭盔，有著更高的衝擊負荷量。與許多發泡聚合物相比，發泡金屬會在撞擊後變形，因此只能使用一次。

3. 金屬泡沫海綿

金屬泡沫海綿可以透過壓縮，來吸收高達 80% 的地震破壞力，並保持原有的形狀不變，所以發泡金屬可以防止像地震中房屋倒塌的狀況。但要取得這些建築具體的抗震性能數據非常困難。

1-3-4 發泡金屬的製作

陳勇勳 [2]在"泡沫金屬之淺論"談到，發泡金屬的製作方式有1. 金屬沉積法 2.熔體發泡劑發泡法 3.氣體注入發泡法 4.浸漿海綿燒結法 5.纖維冶金法 6.鑄造法 7.燒結法 8.濺射法等等，以下列舉一些常見的製作方式。

1. 氣體注入發泡法

氣體注入發泡法是直接向熔融的金屬吹入氣體使金屬液體發泡，發泡用的氣體可以是空氣、氧氣、氫氣、二氧化碳等。此方法是目前生產多孔發泡金屬最廉價的方法，最大的優點是造價低且易於工業化大量生產；缺點為存在著孔洞的大小及其在金屬液體中的分佈難以控制的問題。

2. 燒結法

燒結法就是在高溫度時，物料產生的初始液相，在毛細管現象和表面張力的作用下，物料顆粒開始碰觸、相互作用，冷卻後會固結而成為多孔發泡金屬。為了要讓物料易於成型，可採用黏結劑，但是黏結劑必須在燒結時除去。想提高多孔

發泡金屬的孔隙度，就可以用填充劑，填充劑同樣也需發生昇華、溶解或分解的作用。

3. 鑄造法

鑄造法可細分為熔模鑄造法和粒狀物料周圍澆鑄法兩種。

A. 熔模鑄造法是將先發泡過的塑料填充到一個幾何形的容器內，在其周圍倒入液態的耐火材料，等耐火材料硬化之後，加熱使發泡塑料氣化，這個時候模具就有了原發泡塑料的形狀，再將液態金屬注入到模具內，冷卻後再把耐火材料與金屬分開，就能夠得到形狀一致的發泡金屬。

B. 粒狀物料周圍澆鑄法是把粒狀物料放置於鑄型內，在其周圍澆注金屬，把粒狀物溶解，得到發泡金屬。由於表面張力的原因，金屬有時候不能進入到粒狀物料周圍的縫隙中，這種情況下，就需要在熔體的表面施加壓力以達到澆注之目的。

1-3-5 發泡金屬強化熱傳的作用原理

當氣體與液體從孔中流過時，熱量以強迫對流形式在具有開孔結構的發泡金屬和流體之間傳遞和互換。一方面，發泡金屬複雜的三維立體網狀結構使得流體的非線性效果增強，湍流程度也增強，從而促進固體表面向流體中高的局部熱傳；另一方面，發泡金屬大的比表面積也是金屬具有良好熱傳性能的重要原因。另外，金屬材料高的熱傳導率也是促進熱傳能力提高的因素之一。開孔發泡金屬優良的熱傳性能使其具有承受高密度熱流的能力，可以做為緊湊型熱交換器的散熱材料。

1-4 常見散熱方式簡介

電子元件或裝置在運作之過程中，難以避免的會產生熱，而熱之排除，需藉由傳導、對流及輻射方式將熱排出於周圍環境，降低電子產品的運轉溫度，以維持系統運轉的穩定度與可靠度。電子元件常用的散熱方式為散熱鰭片，散熱鰭片為一種固定於電子元件表面之導熱性材料，藉以將電子元件產生之熱傳導至周圍環境。其構造多為底板和鰭片所組成，底板部分直接與電子元件接觸，主要作用為均熱，使熱快速傳導及擴散；鰭片部份之作用為散熱，藉由表面積之增加來傳遞由底板所擴散之熱至周圍環境。以下是以一般個人電腦上的散熱鰭片為考量，並針對其各種散熱之方式作一介紹與優缺點分析：

(一)自然對流

自然對流是指高溫而比重小的流體向上運動，低溫而比重大的流體向下運動，從而引起的熱交換的一種方式。

優點： 1.無噪音

2.無需電力，可節省能源

3.結構簡單，安裝容易

缺點： 1.散熱效果有限，較適用於功率較小之晶體

2.較難把熱能排出機殼以外

3.高散熱型的體積龐大，重量重，易使基板變形

4.控溫性較不穩定

(二)強制氣冷

強制氣冷是依賴外力作用實現熱交換的對流，在這裡是以空氣為介質的熱傳，並加上高速旋轉之風扇。

優點： 1.散熱效果良好

2.結構簡單，安裝容易

3.控溫性較穩定

4.廉價

缺點： 1.高速旋轉之電扇會產生噪音

2.體積龐大，佔用機殼內部大量空間

(三)水冷散熱

水冷散熱系統的運作原理是以一個小水磊不斷循環系統中的冷卻劑以降低系統溫度。在系統的一端，冷卻劑會通過安裝在 CPU 上的流道散熱座部份(Water Block)。而在系統另一端，冷卻劑則會通過一個以大直徑低轉速的風扇來散熱的「熱交換面」，再把熱氣排至系統以外，因而達到低噪音高效能的效果。

優點： 1.低噪音

2.散熱效果非常優異

3.熱能容易被排出機殼以外

4.控溫性穩定

缺點： 1.結構複雜，安裝不易

2.價格偏高

3.恐有漏水之疑慮

1-5 自然對流介紹

1-5-1 自然對流之基本原理

自然對流是利用流體分子在受熱時，使工作流體的密度發生變化，當環境中的工作流體具有不同密度時，因重力的作用導致工作流體產生運動，這種因工作流體發生溫度分佈，導致不同密度而產生的熱對流現象稱為自然對流。

1-5-2 自然對流常用的無因次參數

在自然對流的探討時，一些常用的無因次參數說明如下：
格拉斯霍夫數(Grashof number, Gr)，其意義為浮力與黏滯力之比值，定義為：

$$Gr = \frac{g\beta(T_{bp} - T_a)L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

普蘭特爾數(Prandtl number, Pr)，表示運動黏滯係數和熱擴散率的比例，也可以視為動量傳遞及熱量傳遞效果的比例，定義為：

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2)$$

瑞里數(Rayleigh number, Ra)，將 Gr 數(1)與 Pr 數(2)相乘

可得，表示，定義為：

$$Ra = \frac{g\beta(T_{bp} - T_a)L^3}{\nu\alpha} = Gr \times Pr \quad (3)$$

紐賽數(Nusselt number, Nu)，表示固液表面間的無因次溫度分佈，為

判斷熱傳效率之重要參數，定義為：

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

1-6 文獻回顧

發泡金屬在工業上的應用方面非常的廣泛，陳勇勳 [2]在"泡沫金屬之淺論"，談到其應用於航空、航太、汽車、建築、化工、冶金、醫藥、電化學以及軍事等方面，如其電磁屏蔽、輕質和優良的吸音、隔音性能，已將其用於製作建築業的隔音板、電子儀器外殼等結構；利用其減振、阻尼性能，做緩衝器、吸振器，例如宇宙飛船的起落架、升降機傳送安全墊、各種包裝箱，特別是空運包裝箱，機床床身、底座、減小齒輪振動和高速磨床吸能內襯等等；利用其輕質、高比強度的特點，用其製作浮水器、運動器材(如雪橇等)、航空航天飛行器的等相對應零件；利用其散熱性能，已用其製作了散熱器；利用其吸收衝擊、減振、阻尼性能，已用其製作汽車、火車側面與前部的防衝部件、軍事裝甲車衝擊防護材料等。

近些年來，鑒於發泡金屬優良的熱傳性能，針對其熱傳性能的影響因素進行了大量的研究。1993年，Chou and Yang [3]以實驗方式來測定多孔性散熱器的散熱能力，並與一般商用鰭板式散熱器作比較。其實驗結果發現在自然對流中傳統散熱鰭片比多孔性散熱器有較好的散熱能力，但在強制對流中多孔性散熱器比商用散熱器有較佳的散熱能力。研究結果發現最好的流場方向是垂直於壁，而 91.4

%孔隙度的發泡鋁在空氣流速 3.6m/s 下的熱傳表現高出一般鰭片陣列散熱器 25%。且在此實驗中發現 8 pores/cm 的多孔性散熱器其熱傳特性最好。同年，Lee et al. [4]對發泡鋁應用於電子元件冷卻進行了測試，發現發熱量 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 的晶片上，使用發泡鋁散熱器和低功率風扇後有極佳的熱傳性能。

1998 年，Chao and Li [5]發表在 T²-BGATM 上方加裝一發泡金屬散熱器的熱傳表現，並與一般商用鰭片散熱器的熱傳表現比較。結果顯示在強制對流下，發泡鋁散熱器有顯著優於一般商用鰭片散熱器 53% 的散熱能力。研究中以實驗方法測定不同孔數率對於多孔性散熱器散熱能力的效應，研究結果發現在強制對流中 40PPI 的發泡鋁其熱阻最低。同年，Bastawros [6]也探討了發泡金屬在強制對流下的熱傳性能。實驗發現發泡金屬的散熱能力是普通的鰭片散熱器的 3 倍，雖然有增大了壓降的缺點，但是發泡金屬的質量只有三分之一。研究還發現在低速的情況下，發泡金屬的散熱主要依靠對流熱傳；在高速流情況下，散熱受限於發泡金屬的導熱性能。

Kim et al. [7]在 2000 年時針對發泡鋁鰭片的熱傳性能與傳統鰭片相比，結果發現前者的傳熱性能明顯優於後者。

2002 年，Phaviknmar and Mahajan [8]對高孔隙度發泡金屬進行的實驗研究，指出在自然對流情況下，彌散作用對散熱雖然不起重要作用，但是在強制對流的情況下，忽略彌散作用將會造成很大的潛在誤差。同年，Boomsma et al. [9-10]以水為冷卻介質，在強制對流的情況下，對尺寸大小相同、孔徑相同、孔隙度和孔數率不同的被壓縮發泡金屬樣品的熱傳情況進行了比較，考察孔結構對發泡金屬熱傳性能的影響，優化發泡金屬的結構。他還用發泡金屬的熱傳性能同傳統的換熱器進行了比較，發現被壓縮發泡金屬換熱器的熱阻要低很多，熱傳性能有很大的提高，指出發泡金屬作為散熱材料誘人的前景。

近年來，發泡金屬在自然對流條件下的研究方面漸漸變多，2005 年，Zhao et al. [11]在真空和常壓環境下，對不鏽鋼(FeCrAlY)發泡金屬的自然對流進行了實驗和數值模擬分析。結果表明自然對流下，各因素對 K_{eff} 的影響達到 50% 以上，而這是由於高的孔隙度和內部貫通的三維結構。流體在多孔介質中流動的一個特點就是彌散效應的存在。

2006 年，Mahdi et al. [12]在自然對流的環境下，研究泡沫鋁用在 CPU 上的散熱情況。他使用了 3 種孔隙度均為 0.97 但孔數率不

同的泡沫鋁來作為研究對象。他首先利用實驗數據擬合出了自然對流情況下熱阻和高度、橫截面積的經驗關係，然後利用所得的公式求出了和工廠配給的 CPU 散熱器相同參數下發泡金屬散熱器的熱阻，發現發泡金屬散熱器的散熱性能要強 3.5 倍。

近年來的研究中，Bhattacharya et al. [13-14]對不同孔數率(5PPI、10PPI、20PPI、40PPI)與不同孔隙度(89%~96%)的發泡鋁進行自然對流熱傳實驗。在一定孔徑下，熱傳率隨孔隙度的增大而增大，且占主導作用。另一方面，孔隙度一定時，孔數率越大，熱傳率越低，這可能是由於孔徑過大造成的。同時分析了 Nu 和 Re 之間的關係。對發泡金屬鰭片式換熱器進行了研究，結論是熱傳率隨著鰭片數的增加而提高，但每一個鰭片的熱傳率相對降低。孔隙度、孔數率、孔徑這些孔結構參數是影響發泡金屬熱傳性能的主要因素，對它們的研究雖然比較多，但存在不夠系統、不夠深入的問題。

以往發泡金屬熱傳的研究中，大部分都著重於研究孔隙度(Porosity)與孔數率(PPI)在強制對流熱傳性能的影響，較少研究是著重於在自然對流條件下發泡金屬散熱鰭片擺放角度的影響。所以本篇論文也加入探討角度對熱傳的影響。

第二章 實驗設備與方法

2-1 實驗設備

本實驗架構主要分為兩部份，一為避免外界空氣擾動與控制環境溫度的自然對流恆溫腔室，一為模擬熱源的測試段。自然對流實驗設備架構示意圖如圖 2-1 所示。以下分別介紹所需用到的實驗設備：

1. **自然對流恆溫腔室**：為 LONG WIN 公司生產的 LW-9022；此恆溫箱內部採用紅外線加熱的方式，可有效的維持恆溫箱內部的溫度在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，箱體為透明壓克力，可以清楚地觀察恆溫箱內部之實驗情況，如圖 2-2 所示。
2. **記錄器**：使用 YOKOGAWA 公司生產的 MX-100，可將從熱電偶得到的訊號轉換成溫度並顯示於電腦上，亦可將之紀錄，如圖 2-3 所示。
3. **電源供應器**：使用 GW 公司的 GPR-7550D，最大輸出電壓為 75V，最大輸出電流為 5A。如圖 2-4 所示。
4. **功率計**：使用 YOKOGAWA 的 WT230，可以直接由顯示面板

觀察電壓、電流及功率值，如圖 2-5 所示。

5. **接觸壓力量測裝置**：本設備為 LONG WIN 公司生產的 LW-9052，壓力範圍：0-100 kgf，壓力精度： $\pm 0.1\%$ ，壓力行程範圍：20 mm，實驗時固定壓力為 20 kgf。如圖 2-6 所示。
6. **電熱片**：使用 Kapton 材料超薄電熱片，尺寸為 100mm \times 100mm，電阻值為 82.7 Ω ，如圖 2-7 所示。
7. **恆溫水槽**：可自由控制水溫之設備，配合恆溫銅塊及溫度量測標準件(RTD)可用來校正 T 型熱電偶，如圖 2-8 所示。
8. **均溫銅塊**：配合恆溫水槽來校正熱電偶，如圖 2-9 所示。
9. **T 型熱電偶**：線芯使用銅/銅鎳合金兩條金屬線所構成，當兩種不同性質之金屬端點接觸，形成一封閉迴路，但因兩種金屬性質上的差異，使得不同端點間存在溫度差，而此溫度差則會造成電動勢進而產生電流，記錄器則會依照兩金屬間之電位差來將此訊號轉換成溫度並顯現於記錄器上。如圖 2-10 所示。
10. **標準溫度計**：以 RTD 作為標準溫度計，來校正 T 型熱電偶，如圖 2-11 所示。
11. **真空斷熱板**：真空絕熱板(Vacuum Insulation Panel, 簡稱 VIP)

是真空保護表層內填充芯材，抽真空後再熱封而成的一種板材。由於它有效地避免空氣對流傳熱，因此導熱系數大幅度降低，小於 0.004W/mK ，僅為目前最常用保溫材料——聚氨酯硬質泡綿的 $1/4\sim 1/6$ ，是世界上最先進的高效保溫材料。如圖 2-12 所示。

2-2 儀器校正

2-2-1 熱電偶校正

在實驗操作之前，必須先校正熱電偶，才可確認量測溫度之精準性。本實驗使用採用 OMEGA 販售之 T-type 熱電偶，其標準誤差為 1°C 或 0.75% 。因此在實驗操作之前，須先校正熱電偶方能確定量測溫度之精確性。校正儀器包含一經過校正之電阻式溫度計以及恆溫水槽。首先將熱電偶的一端與記錄器連接，另一端則放入一均溫銅塊的孔洞內，最後將銅塊放置於恆溫水槽中。依實驗的需求，校正範圍為 20°C 至 100°C ，並將標準溫度計的溫度感應端放入均溫銅塊的中央量測溫度。校正以 20°C 為一個階段，記錄每一條熱電偶量測出來的溫度以及標準溫度計量測出來的溫度。溫度量測完畢後，熱電偶量測出來的溫度為橫軸，標準溫度計量測出來的溫度為縱軸，最後可以獲得每條熱

電偶之 $y = ax + b$ 之關係式。在此校正25條熱電偶，其校正方程式如表2-1所示。其中一條熱電偶的校正曲線如圖2-13所示。

2-3 實驗步驟與資料簡化

為了避免外界空氣的擾動而影響實驗的準確性，實驗是在一個瑞領科技股份有限公司生產的LW-9022自然對流恆溫腔室中進行，體積為 $86 \times 86 \times 116\text{cm}$ (W×D×H)，可提供環境溫度介於室溫 $+3^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ，溫度精度： $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，溫度均勻度： $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。本實驗為量測發泡銅散熱鰭片在自然對流條件下之熱傳性能，樣本上視圖與前視圖如圖2-14與2-15所示。實驗參數為有無燒結發泡銅、發泡銅厚度與孔數率，並以銅平板作為對照。不同厚度與孔數率(PPI)發泡銅條如圖2-16所示。散熱鰭片在環境溫度 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 下進行實驗，電源供應器輸入功率從2.5W到25W。

為減少擴散熱阻，電熱片與散熱鰭片底板為相同面積，電熱片下方以VIP板(真空斷熱板、真空絕熱板)($k < 0.004\text{W/mK}$)作為絕熱材料以減少熱損。電熱片與散熱鰭片底板間塗上散熱膏($k = 3\text{W/mK}$)。為了減少接觸熱阻，以LW-9052接觸壓力量測裝置來施加壓力，每次實驗固定壓力為20kgf，電熱片以電源供應器加熱。

為計算熱損失，在實驗到達穩態時，以紅外線熱像儀拍攝真空斷熱板上的溫度分布，再經由熱對流公式，計算熱損失。每組數據大約需要二至三個小時才到達穩態。

本研究鰭片散發的熱傳量(q)由加熱功率(P)減去熱損(q_{loss})得到，其中加熱功率由功率計量測到的電壓及電流計算而得，計算式如下：

$$P = IV \text{ (W)} \quad (5)$$

$$q = P - q_{loss} \text{ (W)} \quad (6)$$

本實驗環境溫度控制在 30°C ，而 Nu 和 Ra 等熱力學性質是以薄膜溫度計算，如下：

$$T_f = \frac{T_a + T_{bp}}{2} \quad (7)$$

T_a 為 RTD 在測試鰭片上方 10cm 處量測到的環境溫度； T_{bp} 為量測散熱鰭片底板五點平均位置的溫度再取平均，量測位置示意圖如圖 2-17 所示。

熱傳係數數可以用以下計算：

$$h = \frac{q}{A(T_{bp} - T_a)} \quad (8)$$

其中 A 為熱傳面積，實心散熱鰭片為總表面積，發泡金屬散熱鰭片視為相同幾何尺寸實心散熱鰭片總表面積。

紐賽數

$$Nu = \frac{hL}{k_{air}} \quad (9)$$

瑞理數

$$Ra = \frac{g\beta(T_{bp} - T_a)L^3}{\nu\alpha} \quad (10)$$

在進行自然對流實驗以前，先做平板的實驗和 Al-Arabi and

El-Riedy [15]的經驗式做比較，如圖 2-18 所示。

實驗除了做水平角度以外，還另外做垂直角度。由於垂直角度又有兩種擺放方式，所以分為垂直橫向與垂直縱向擺放，如圖 2-19 所示。各種樣本形式工程圖如圖 2-20 所示。

第一、二、三組實驗樣本相關參數如表 2-2、2-3、2-4 所示。

實驗樣本總表如表 2-5 所示。

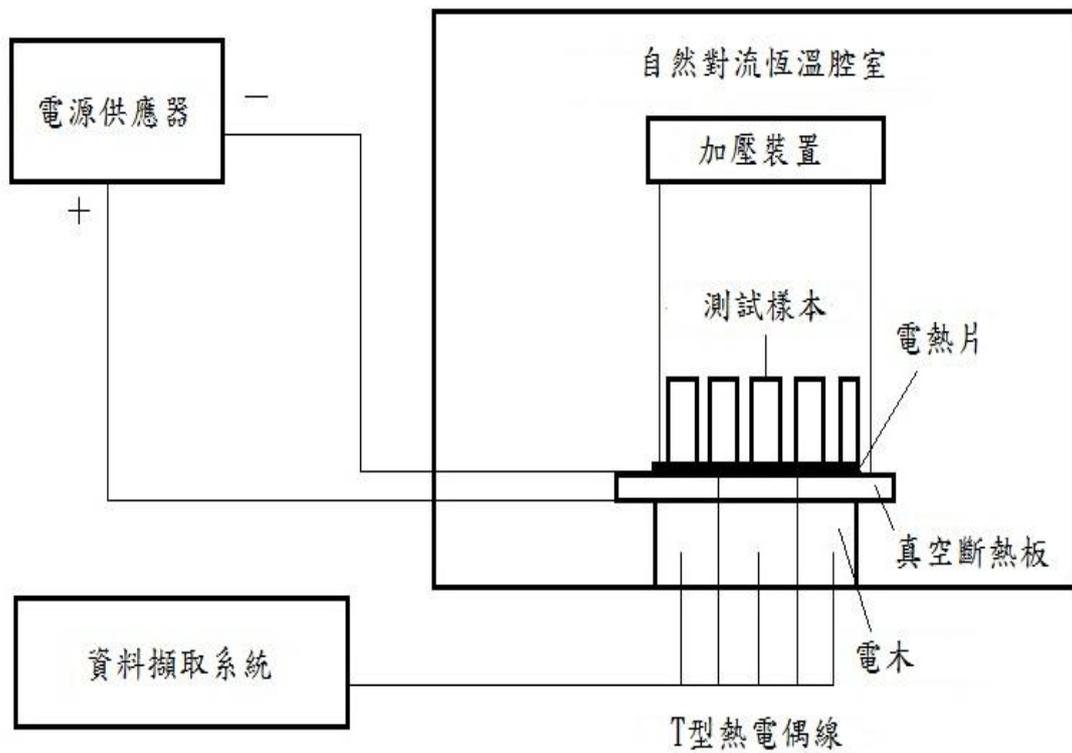


圖 2-1 自然對流實驗設備架構示意圖

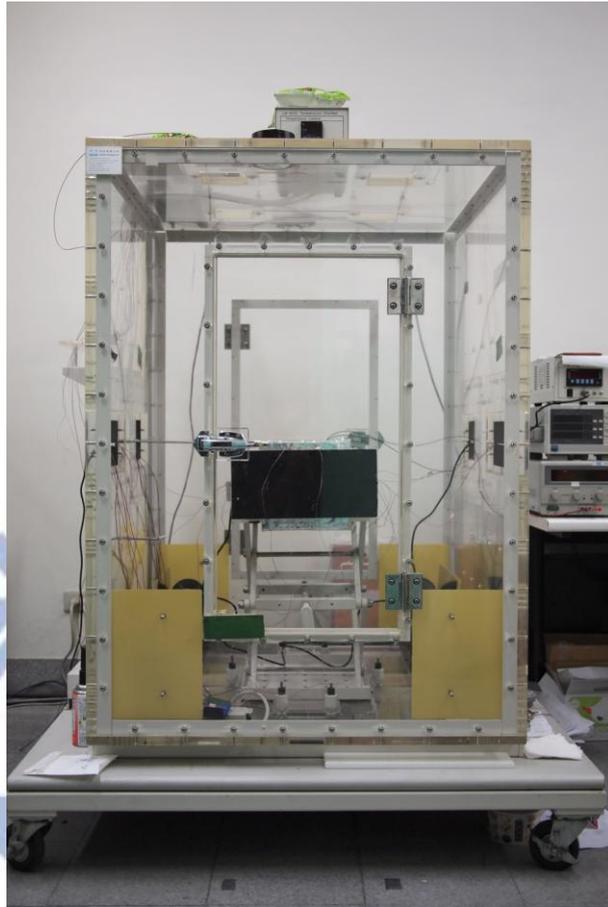


圖 2-2 自然對流恆溫腔室



圖 2-3 MX100 紀錄器

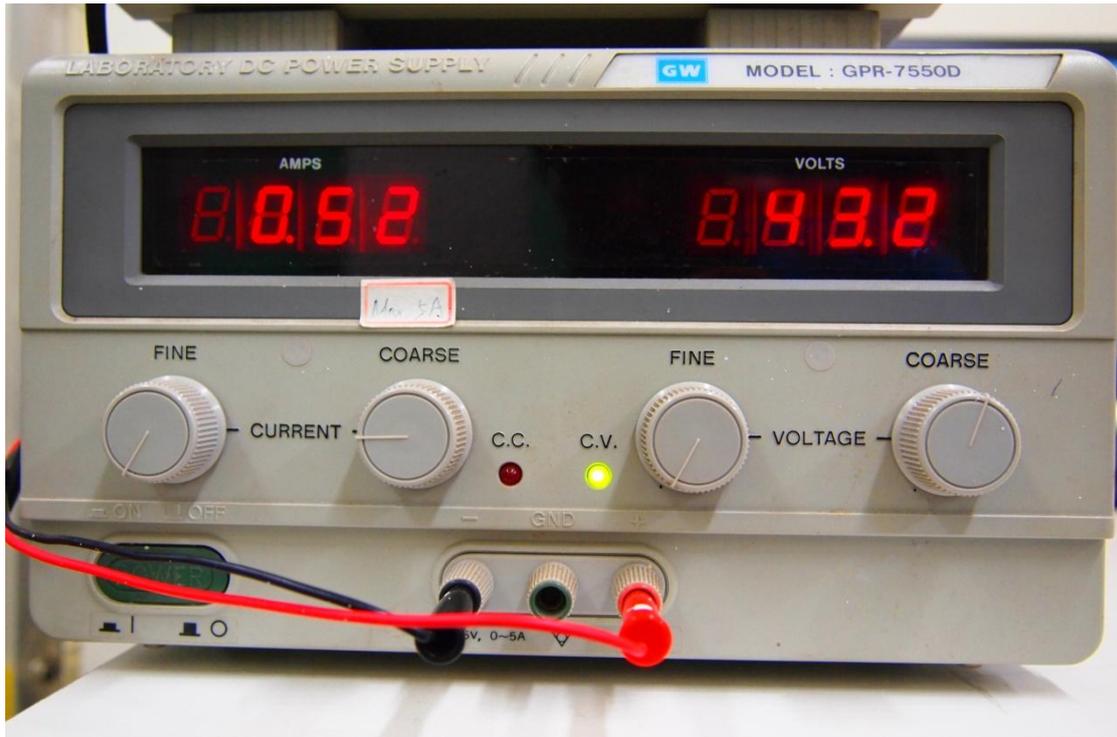


圖 2-4 電源供應器

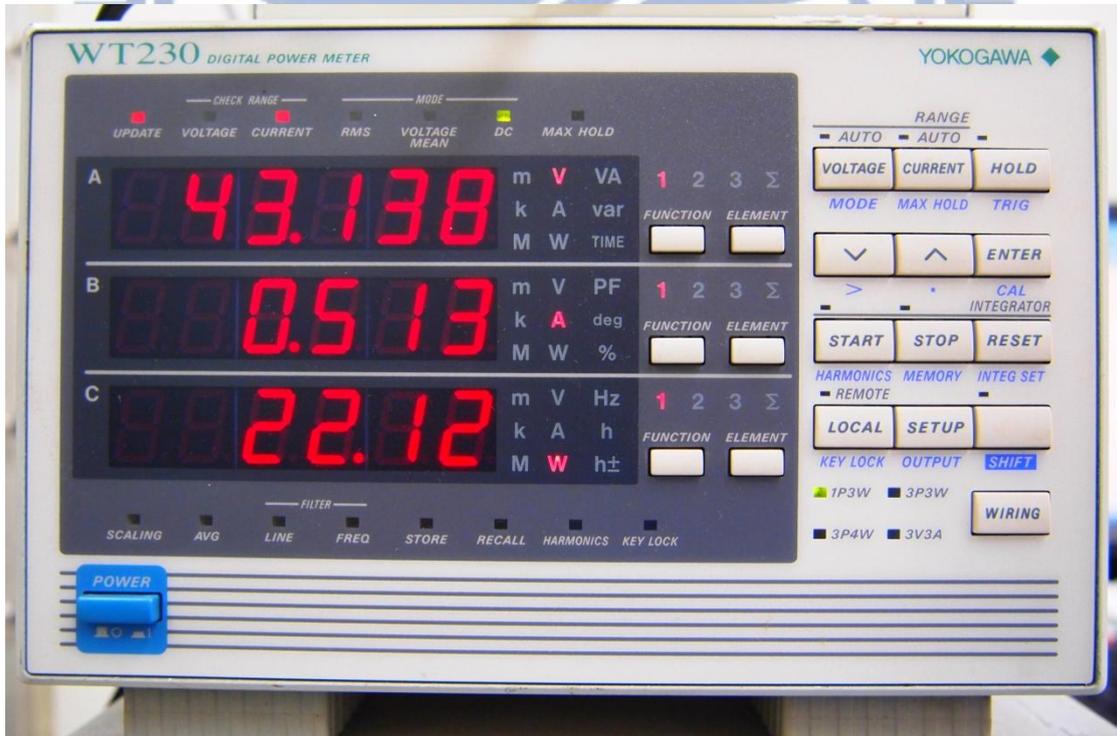


圖 2-5 功率計



圖 2-6 接觸壓力量測裝置

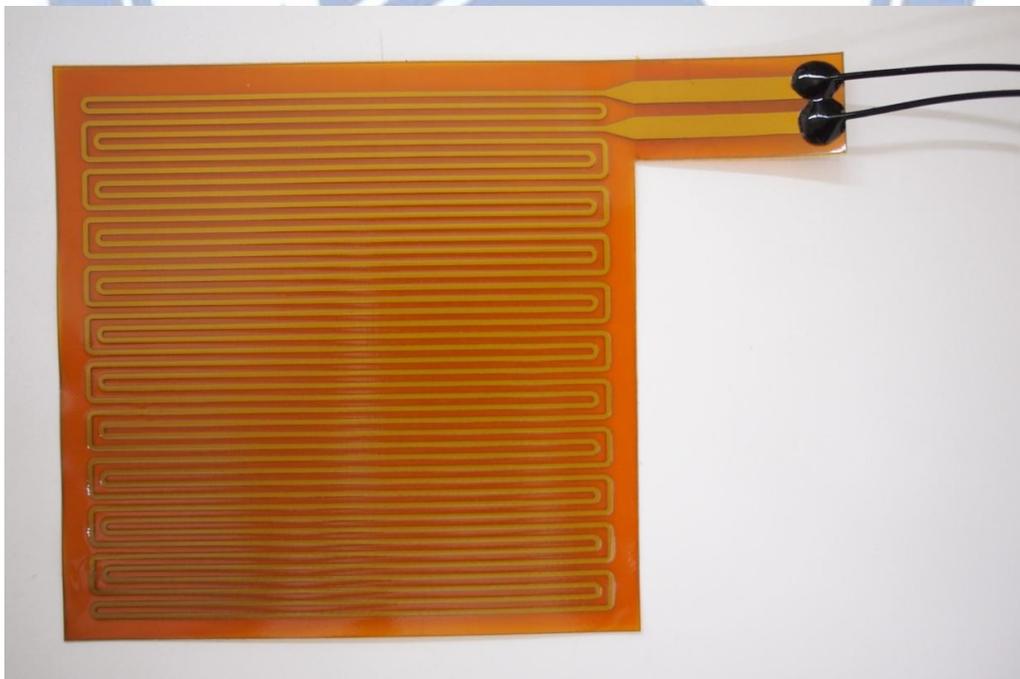


圖 2-7 電熱片



圖 2-8 恆溫水槽

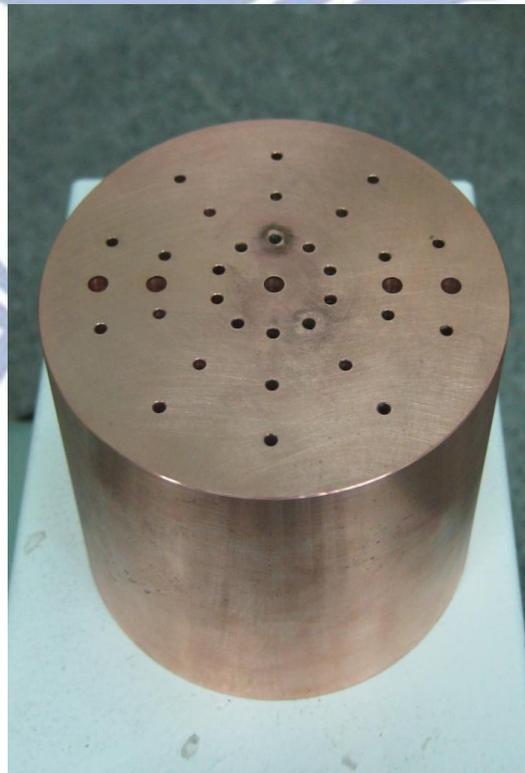


圖 2-9 均溫銅塊

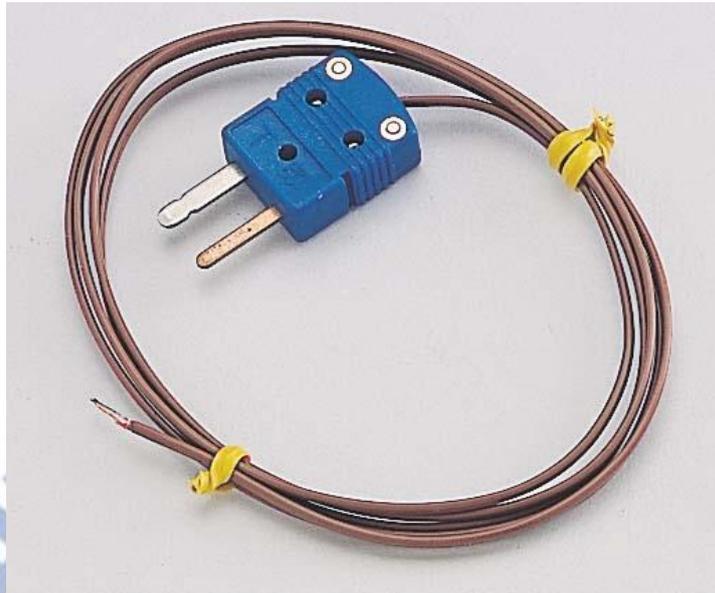


圖 2-10 T 型熱電偶



圖 2-11 標準溫度計(RTD)

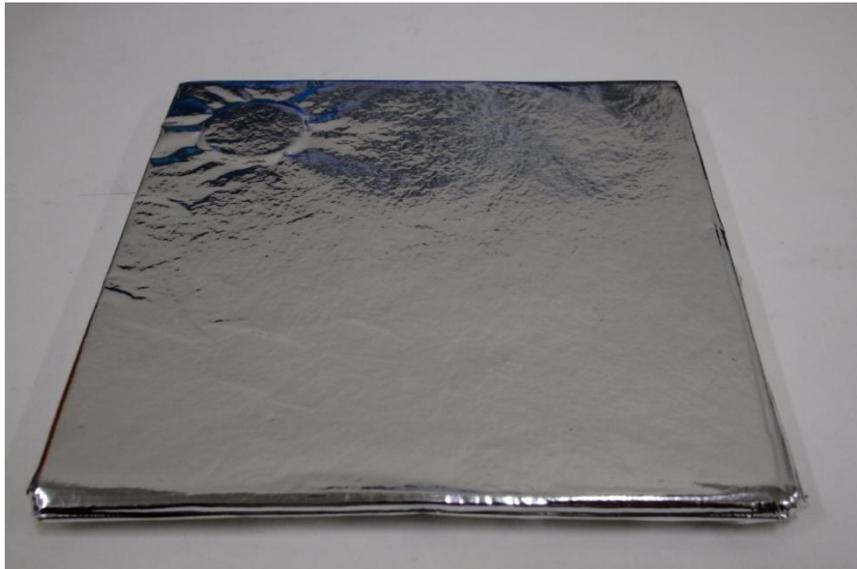


圖 2-12 真空斷熱板

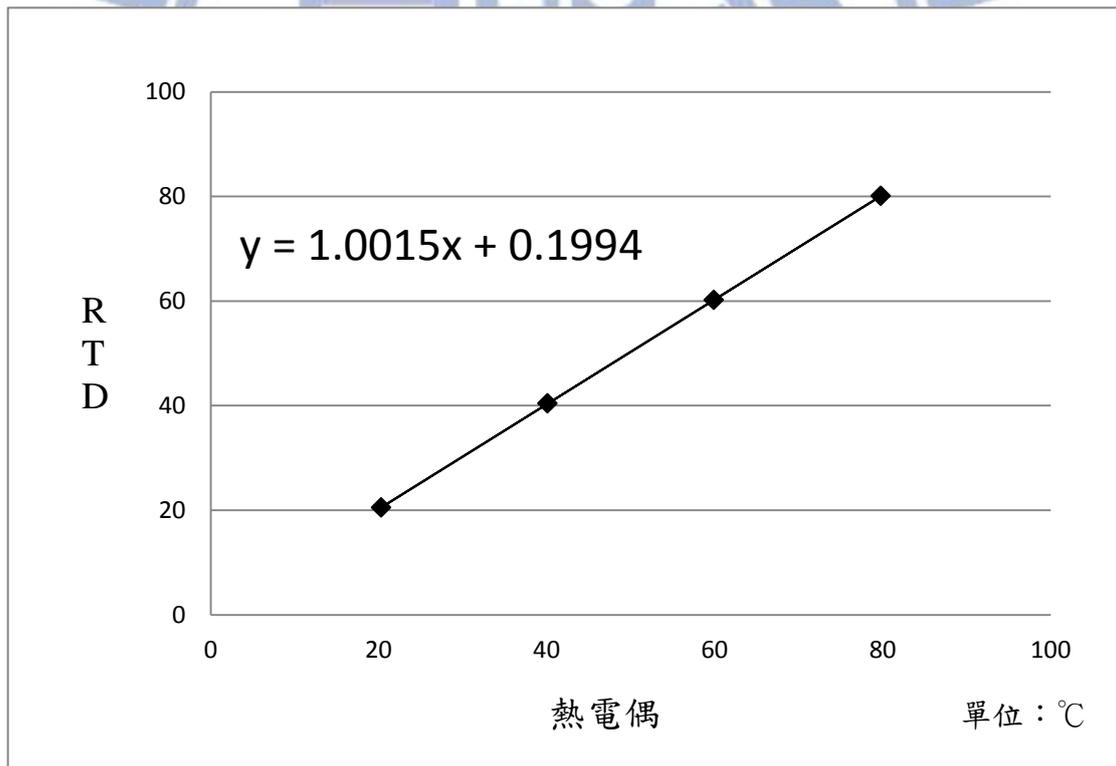


圖 2-13 熱電偶校正方程式：線性方程式



圖 2-14 發泡銅樣本上視圖

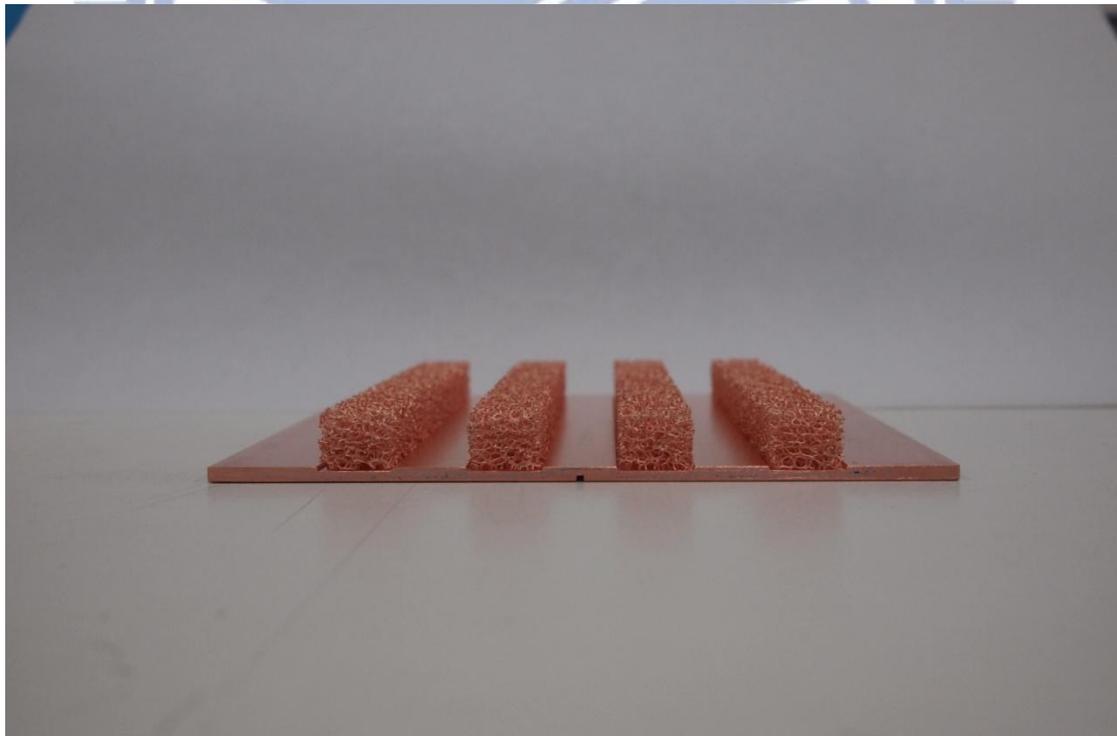


圖 2-15 發泡銅樣本前視圖



圖 2-16 不同厚度與孔數率(PPI)發泡銅條

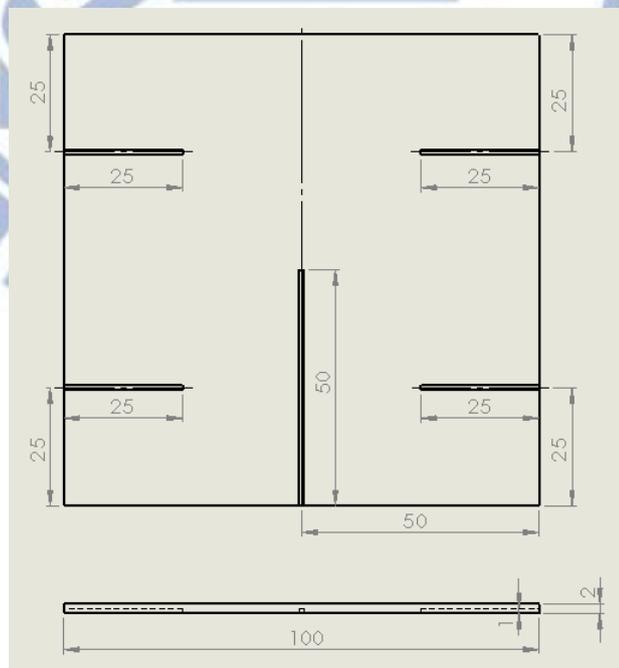


圖 2-17 熱電偶線量測 T_{bp} 位置(五點取平均)

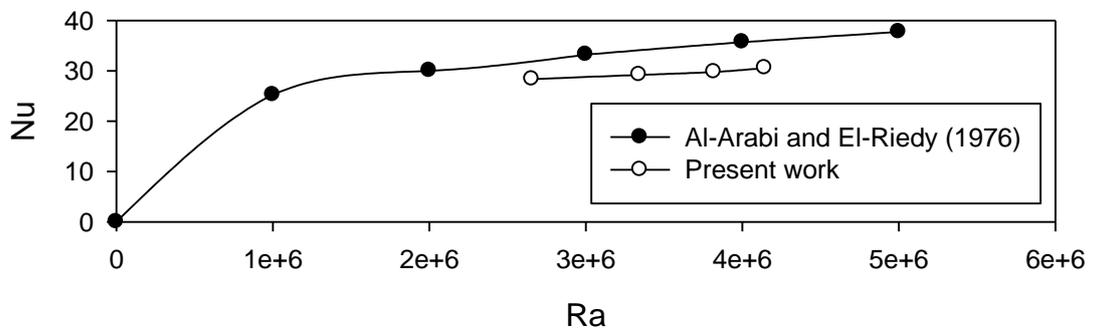


圖 2-18 平板自然對流實驗與經驗式比較

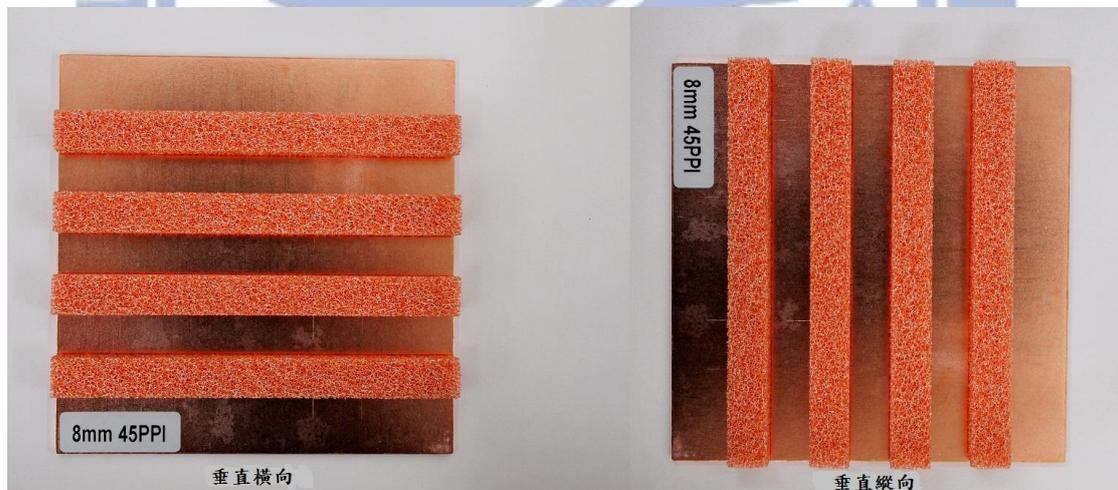
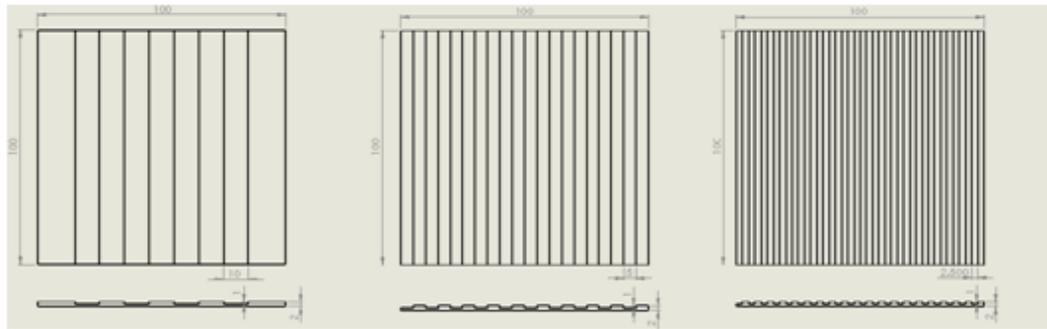


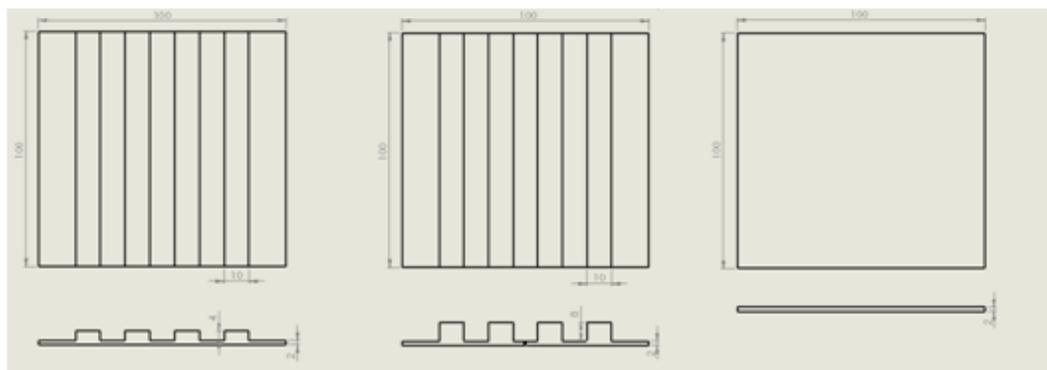
圖 2-19 垂直橫向與垂直縱向擺放



(a) 10mm 間隙

(b) 5mm 間隙

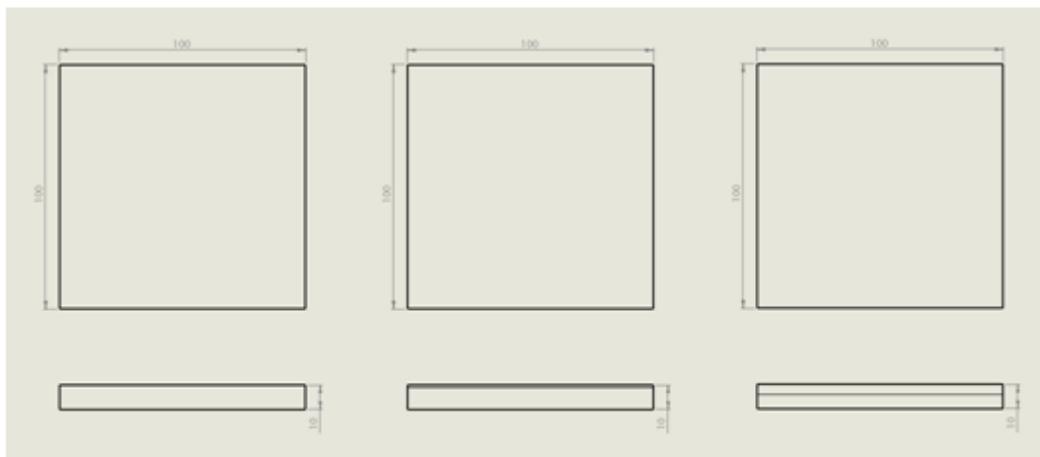
(c) 2.5mm 間隙



(d) 4mm 鳍片

(e) 8mm 鳍片

(f) 2mm 平板



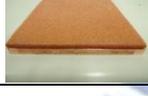
(g) 10mm 平板 (h) 9mm 底板+1mm 發泡銅 (i) 6mm 底板+4mm 發泡銅

圖 2-20 各種樣本形式工程圖

表 2-1 熱電偶校正方程式

°C	20	40	60	80	線性方程式
RTD	20.50	40.40	60.2	80.1	
1	20.3	40.1	59.9	79.8	$y = 1.0015x + 0.1994$
2	20.4	40.2	60.0	79.8	$y = 1.0021x + 0.1109$
3	20.4	40.2	60.0	79.9	$y = 1.0015x + 0.097$
4	20.5	40.2	60.0	79.9	$y = 1.003x + 0.0135$
5	20.3	40.2	60.0	79.8	$y = 1.0016x + 0.1471$
6	20.4	40.2	60.0	79.9	$y = 1.0015x + 0.0992$
7	20.4	40.2	60.0	79.9	$y = 1.0015x + 0.0992$
8	20.3	40.2	60.0	79.8	$y = 1.0015x + 0.1493$
9	20.4	40.3	60.0	79.9	$y = 1.002x + 0.0489$
10	20.4	40.3	60.1	79.9	$y = 1.0015x + 0.0491$
11	20.2	40.2	60.0	80.0	$y = 0.997x + 0.351$
12	20.3	40.3	60.1	80.0	$y = 0.9985x + 0.2008$
13	20.3	40.3	60.1	80.0	$y = 0.9985x + 0.2008$
14	20.3	40.2	60.1	80.0	$y = 0.998x + 0.2508$
15	20.2	40.2	60.0	80.0	$y = 0.997x + 0.351$
16	20.2	40.2	60.1	80.0	$y = 0.9965x + 0.3511$
17	20.2	40.2	60.0	80.0	$y = 0.997x + 0.351$
18	20.2	40.1	60.0	79.9	$y = 0.998x + 0.3506$
19	20.2	40.2	60.0	80.0	$y = 0.997x + 0.351$
20	20.2	40.2	60.0	79.9	$y = 0.9985x + 0.3006$
21	20.5	40.3	60.0	79.9	$y = 1.0035x - 0.0524$
22	20.5	40.3	60.1	79.9	$y = 1.003x - 0.0521$
23	20.5	40.3	60.0	79.8	$y = 1.0051x - 0.1038$
24	20.4	40.3	60.0	79.9	$y = 1.002x + 0.0489$
25	20.4	40.2	60.0	79.8	$y = 1.003x + 0.0482$

表 2-2 第一組實驗樣本相關參數

樣本 照片	樣本名稱	鰭片 厚度 (mm)	底板 厚度 (mm)	發泡 銅厚 (mm)	熱傳面積 (m ²)
	10mm 平板	10	10	0	0.014
	1mm, 50PPI	10	9	1	0.014
	4mm, 50PPI	10	6	4	0.014

其中： H_f ：鰭片厚 H_{bp} ：底板厚 H_{fm} ：發泡銅厚 A_t ：總表面積

表 2-3 第二組實驗樣本相關參數

樣本 照片	樣本名稱	H_f	H_{bp}	H_{mf}	重量(g)	減輕 重量 (%)
	2mm 平板	2	2	0	176.8	*
	表面全發泡	2	2	1	181.4	-2.6
	2.5mm 間隙	2	2	1	156.3	11.6
	5mm 間隙	2	2	1	156.0	11.8
	10mm 間隙	2	2	1	156.5	11.5

註：減輕重量為與 2mm 平板重量相比，負值代表增加重量

表 2-4 第三組實驗樣本相關參數

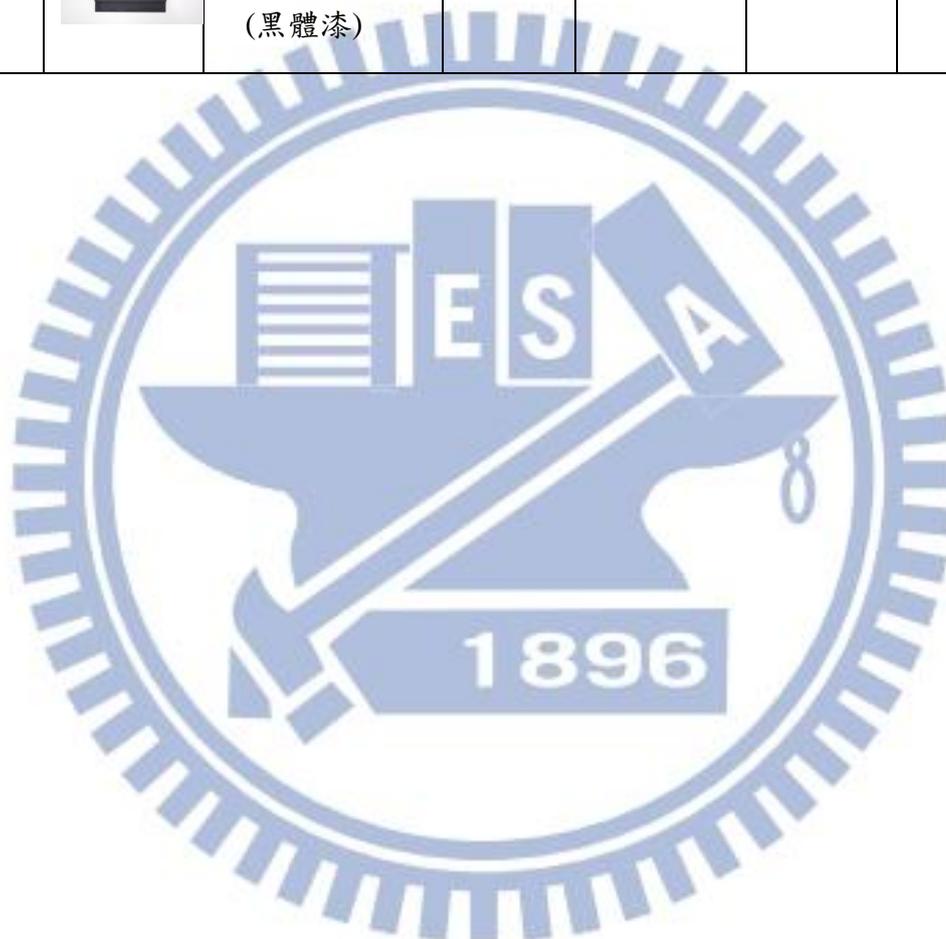
樣本 照片	樣本名稱	H_f	H_{bp}	H_{mf}	重量 (g)	減輕重量 (%)
	2mm 平板	2	2	0	176.80	*
	8mm 實心銅	10	2	0	456.88	*
	8mm,30PPI	10	2	8	171.25	62.5
	8mm,40PPI	10	2	8	171.74	62.4
	8mm,45PPI	10	2	8	173.94	61.9
	4mm 實心銅	6	2	0	316.89	*
	4mm,35PPI	6	2	4	168.22	46.9
	10mm,10PPI	12	2	10	172.02	*
	10mm,20PPI	12	2	10	170.11	*
	2mm 平板 (黑體漆)	2	2	0	177.97	-6.62
	4mm 實心銅 (黑體漆)	6	2	0	319.2	-7.29

註：減輕重量為與同體積實心純銅相比，負值代表增加重量

表 2-5 實驗樣本總表

樣本 編號	樣本 照片	樣本名稱	PPI	表面積 (m ²)	鰭片 高度	質量(g)
1		10mm 平板	*	0.014	*	890
2		1mm,50PPI	50	0.014	*	808.66
3		4mm,50PPI	50	0.014	*	526.76
4		2mm 平板	*	0.0108	*	176.8
5		表面全發泡	50	0.0108	*	181.4
6		2.5mm 間隙	50	0.0108	1	156.3
7		5mm 間隙	50	0.0108	1	156
8		10mm 間隙	50	0.0108	1	156.5
9		8mm 實心銅	*	0.01784	8	456.88
10		8mm,30PPI	30	0.01784	8	171.25
11		8mm,40PPI	40	0.01784	8	171.74
12		8mm,45PPI	45	0.01784	8	173.94
13		4mm 實心銅	*	0.01432	4	316.89
14		4mm,35PPI	35	0.01432	4	168.22
15		10mm,10PPI	10	0.0196	10	172.02

16		10mm,20PPI	20	0.0196	10	170.11
17		2mm 平板 (黑體漆)	*	0.0108	*	177.97
18		4mm 實心銅 (黑體漆)	*	0.01432	4	319.2



第三章 結果與討論

第一組實驗在固定鰭片總厚度條件下，觀察三種發泡金屬散熱鰭片樣本在自然對流條件下的熱傳性能，有三種不同發泡金屬厚度與孔洞大小型式之散熱鰭片，包括：10mm 平板、9mm 平板燒結 1mm,50PPI 鰭片(簡稱 9+1mm,50PPI) 和 6mm 平板燒結 4 mm,50PPI 鰭片(簡稱 6+4mm,50PPI)

由溫度差(ΔT)與熱傳係數(h)作圖(圖 3-1)可知，6+4mm,50PPI 樣本的熱傳係數最高，較 10mm 平板高約 6.6%，再來是 9+1mm,50PPI，較 10mm 平板高約 3.5%，10mm 平板的熱傳係數最低。

由於發泡金屬具有多孔性結構，使得空氣可以在內部進行熱交換，發泡金屬越厚，空氣更能從側邊流入內部受熱後再從上方排出，所以有燒結發泡銅的樣本，熱傳係數皆較平板高；燒結 4mm 發泡銅的熱傳係數又比燒結 1mm 的高。

第二組實驗樣本為在底板表面洗溝槽，在溝槽內燒結 1mm,50PPI 的發泡銅，實驗參數為改變溝槽間隙寬度，包括：2mm 平板、表面全發泡、10mm 間隙、5mm 間隙與 2.5mm 間隙五種樣本。

加工此實驗樣本的構想是希望藉由散熱鰭片表面相間不同材質(銅與發泡銅)加熱後產生的溫度差異，而有額外的熱對流發生。

由溫度差(ΔT)與熱傳係數(h)作圖可知，不管在水平與垂直角度下，表面全發泡樣本的熱傳係數較高。如圖 3-2 與圖 3-3 所示。

因為表面全發泡樣本有較大的表面積，使其可以更有效的進行熱交換，所以相較於一般金屬，只能在面積表面進行熱對流，有更佳的熱傳性能。

第二組實驗樣本的重量的方面，如 2mm 平板的重量為 176.8g，而表面全發泡樣本的重量的為 181.4g，增加重量約 2.6%；2.5mm 間隙樣本的重量的為 156.3g，減輕重量約 11.6%；5mm 間隙樣本的重量的為 156.0g，減輕重量約 11.8%；10mm 間隙樣本的重量的為 156.5g，減輕重量約 11.5%。如表 2-3 所示。

第三組實驗做相同底板燒結不同厚度與孔數率的發泡金屬，包括：2mm 銅平板、8mm,30PPI 鰭片、8mm,40PPI 鰭片、8mm,45PPI 鰭片、4mm,35PPI 鰭片、10mm,10PPI 鰭片、10mm,20PPI 鰭片，並加工 4mm 與 8mm 實心銅散熱鰭片作為對照組。

由溫度差(ΔT)與熱傳係數(h)作圖(圖 3-4)可知，經由實驗量測溫度並計算得到的熱傳係數大致上分部在三個區域，下方區域皆為 8mm 與 10mm 樣本在垂直橫向擺放時的數據，熱傳係數較低；中間區域皆為 8mm 與 10mm 樣本在水平角度與垂直縱向擺放時的數據，

熱傳係數較垂直橫向高;上方區域皆為 4mm 樣本的實驗數據，熱傳係數相對較高。

由上方區域觀察，可以發現 4mm,35PPI 樣本在水平角度時的熱傳係數最高，其次是垂直縱向，垂直橫向最低;4mm 對照組在垂直水平角度與垂直縱向下的熱傳係數與 4mm,35PPI 樣本在垂直縱向下幾乎沒有差異，而 4mm 對照組在垂直橫向的方向下熱傳係數相對較低。

由於 10PPI 的樣本較 20PPI 的樣本孔洞大，所以空氣更能有效的流入發泡金屬內部進行熱交換，所以在相同角度下 10PPI 的樣本熱傳係數皆較 20PPI 來的高；在垂直橫向放置下，由於鰭片阻擋到熱空氣的上升，使得其熱傳係數較水平與垂直縱向放置下低。

在 10mm,10PPI 與 10mm,20PPI 樣本的數據圖中，可以歸內出幾點特性，(1)水平放置的熱傳係數皆較高，其次是垂直縱向放置，垂直橫向放置的熱傳係數最低。(2)在相同放置角度下，10mm,10PPI 樣本的熱傳係數皆較 10mm,20PPI 樣本的高，而在水平放置與垂直橫向放置時差異較明顯。如圖 3-5 所示。

發泡銅散熱鰭片與同體積的實心銅散熱鰭片重量相比，減輕的

重量非常大，如 4mm 實心銅的重量為 316.89g，而 4mm,35PPI 樣本
的重量為 168.22g，減輕重量約 46.9%；8mm 實心銅的重量為 456.88g，
而 8mm,30PPI 樣本的重量為 171.25g，減輕重量約 62.5%；8mm,40PPI
樣本的重量為 171.74g，減輕重量約 62.4%；8mm,45PPI 樣本的重量
為 173.94g，減輕重量約 61.9%。如表 2-4 所示。

以下分別就固定某參數對熱傳性能作探討：

1. 改變孔數率(PPI)

樣本：(1) 8mm 實心銅 (2) 8mm,30PPI (3) 8mm,40PPI (4)
8mm,45PPI

在固定鰭片高度下(8mm)，探討改變鰭片孔數率對熱傳性能
的影響，一共做四組樣本。由實驗數據發現，不管是在垂直縱向、
垂直橫向或水平角度下，8mm,40PPI 的熱傳係數皆較其他樣本高。
其餘樣本差異不大。

2. 改變高度

樣本：(1) 2mm 平板 (2) 4mm,35PPI (3) 8mm,30PPI (4) 8mm,40PPI

在固定角度下(水平角度)，探討改變鰭片高度(2→4→8mm)對熱傳係數的影響，一共比較四組樣本。實驗數據圖顯示，鰭片高度越低，其熱傳係數越高，如圖 3-6 所示。

3. 改變角度

(1) 垂直橫向 (2) 垂直縱向 (3) 水平角度

在相同鰭片下，探討改變鰭片放置角度對實驗的影響，一共做三組不同的角度。實驗結果顯示，角度對熱傳性能的影響特別顯著。垂直縱向與水平角度放置的熱傳係數較高，垂直橫向放置的較低。因為其餘樣本的趨勢都一樣，故僅放 8mm,30PPI 發泡銅樣本的數據圖，如圖 3-7 所示。

4. 熱輻射效應

樣本：(1) 2mm 銅平板 (2) 4mm 實心銅

本實驗還探討熱輻射效應對熱傳性能的影響，實驗方法為有無噴黑體漆。實驗使用的黑體漆放射率為 0.89，做 2mm 銅平板與 4mm 實心銅兩組樣本。實驗結果發現，有噴黑體漆的樣本熱傳係數大幅增加。2mm 銅平板樣本中，在水平角度與垂直角度下的熱傳係數幾乎沒有差異，2mm 銅平板在輸入功率 12.5W 時的熱傳係數為 7.33，而噴黑體漆後的熱傳係數為 10.71，熱傳係數高 46%。實驗數據圖如圖 3-8 所示。

4mm 實心銅樣本中，4mm 實心銅在垂直橫向擺放、輸入功率 12.5W 時的熱傳係數為 5.60，而噴黑體漆後的熱傳係數為 8.17，熱傳係數高 46%；在水平擺放時，熱傳係數分別為 6.01 與 8.47，高 41%；在垂直縱向擺放時，熱傳係數分別為 6.0 與 8.5，高 42%。實驗數據圖如圖 3-9 所示。

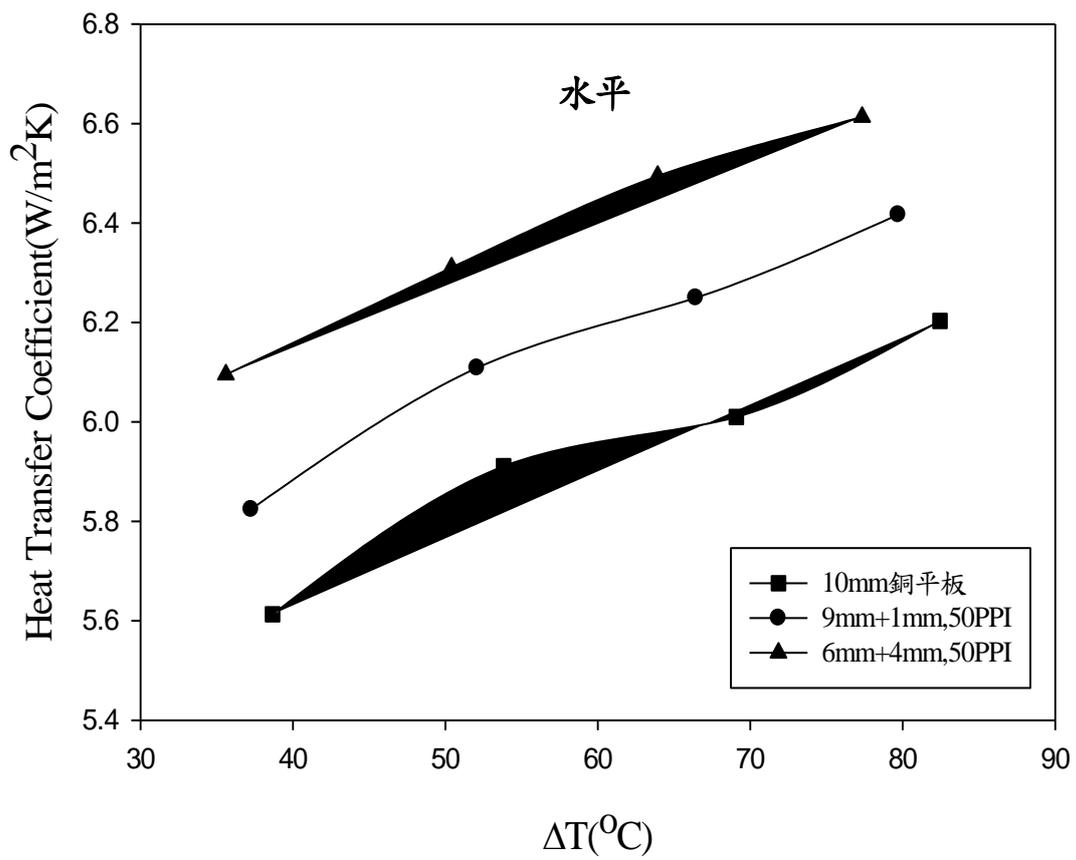


圖 3-1 第一組實驗水平角度熱傳係數

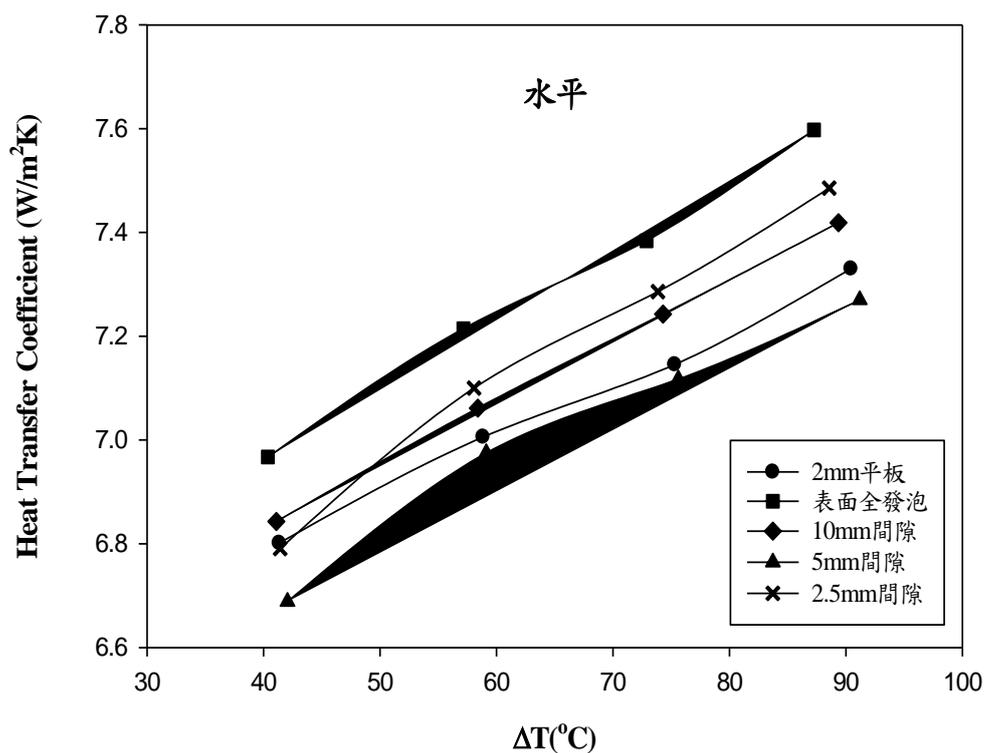


圖 3-2 第二組實驗水平角度熱傳係數

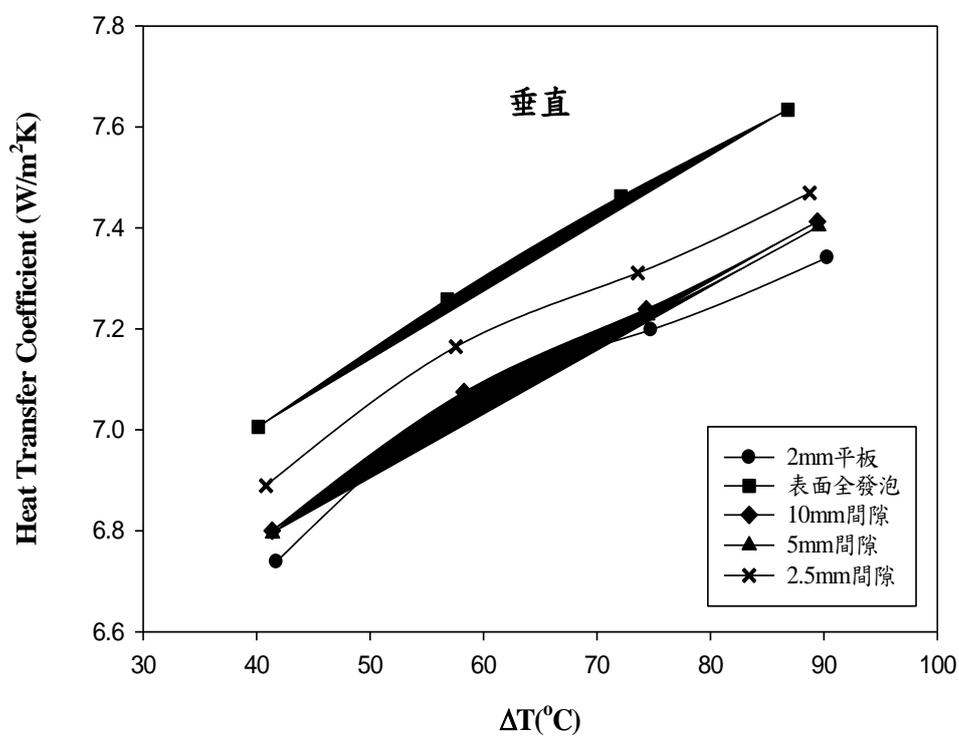


圖 3-3 第二組實驗垂直角度熱傳係數

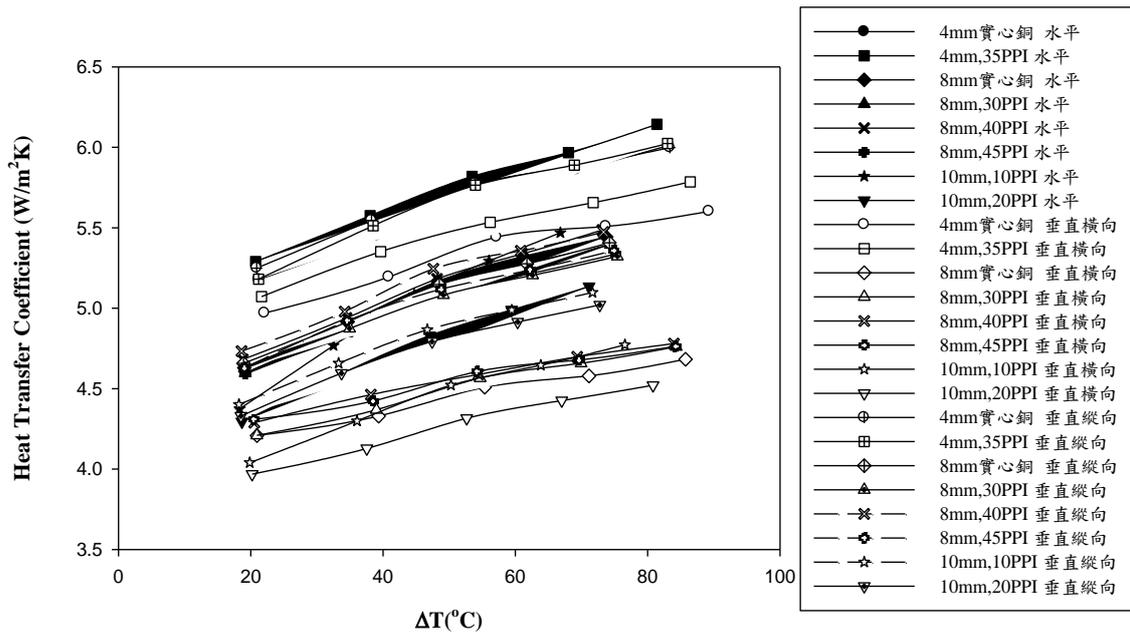


圖 3-4 第三組實驗熱傳係數

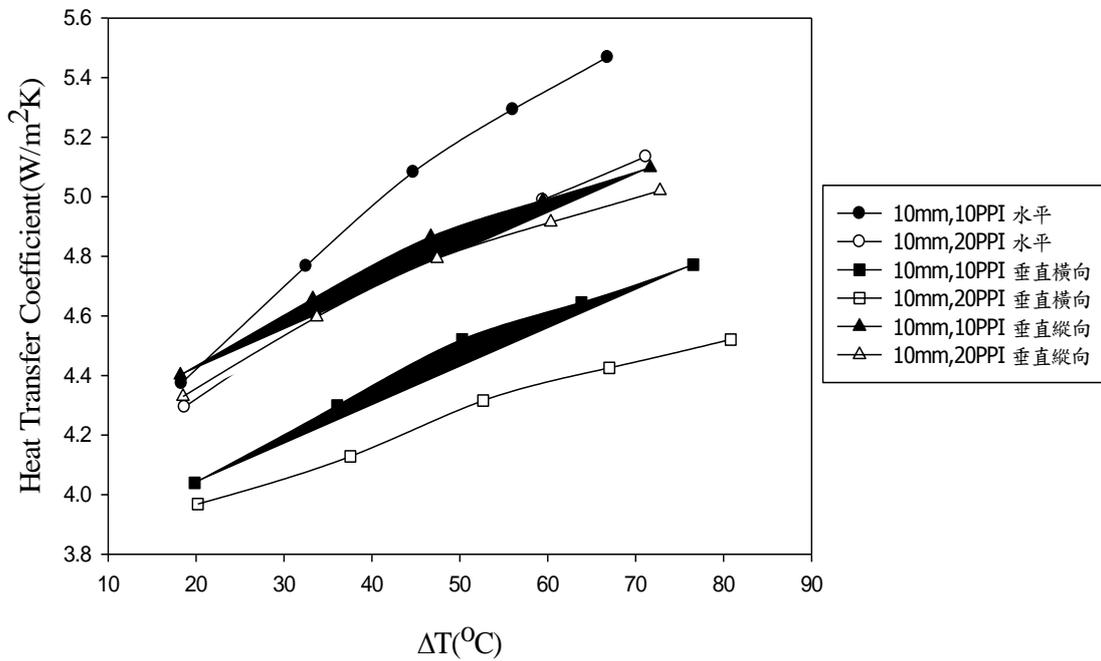


圖 3-5 10mm,10,20PPI 發泡銅樣本熱傳係數

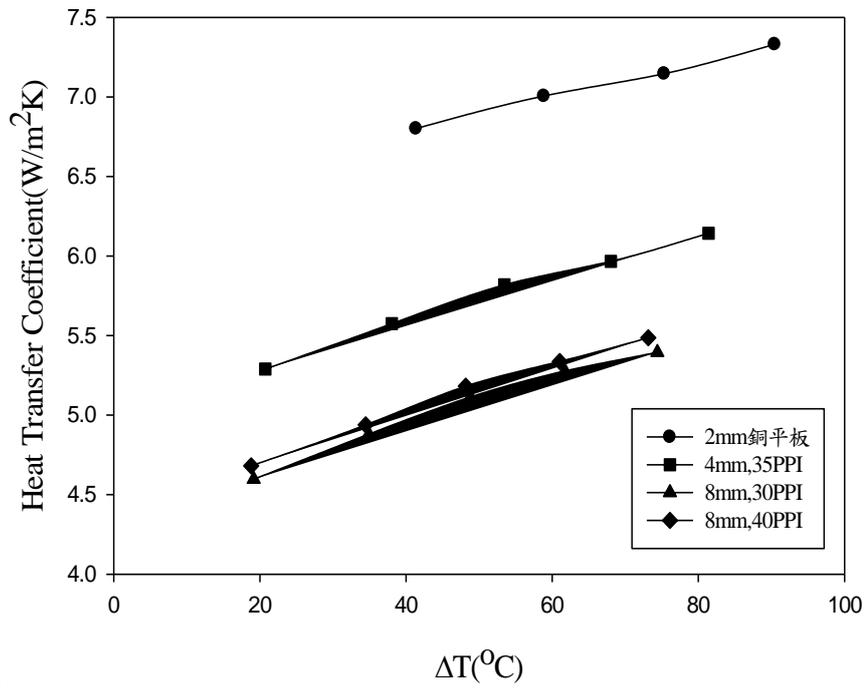


圖 3-6 不同鰭片高度在水平角度下的熱傳係數

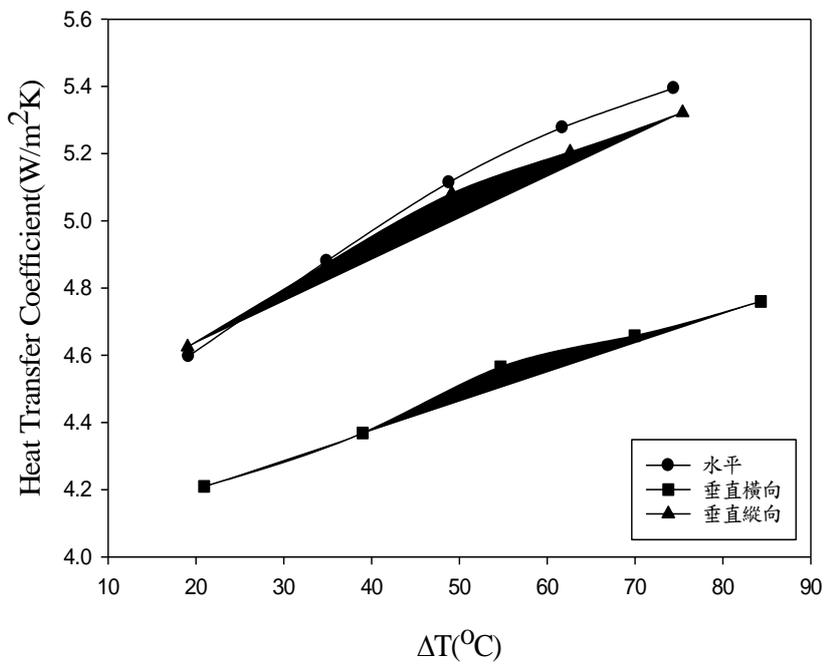


圖 3-7 8mm, 30PPI 發泡銅樣本

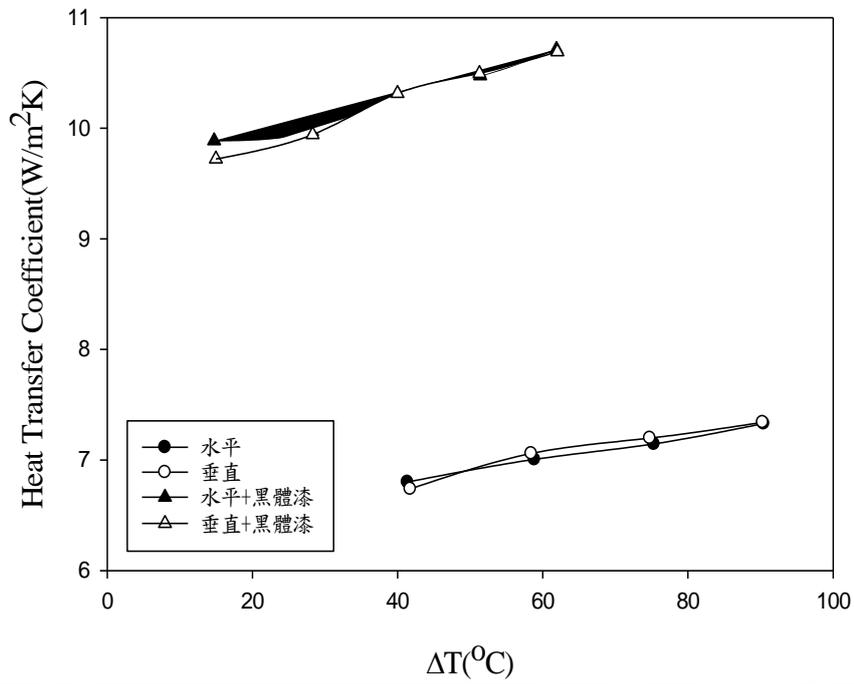


圖 3-8 2mm 銅平板熱傳係數

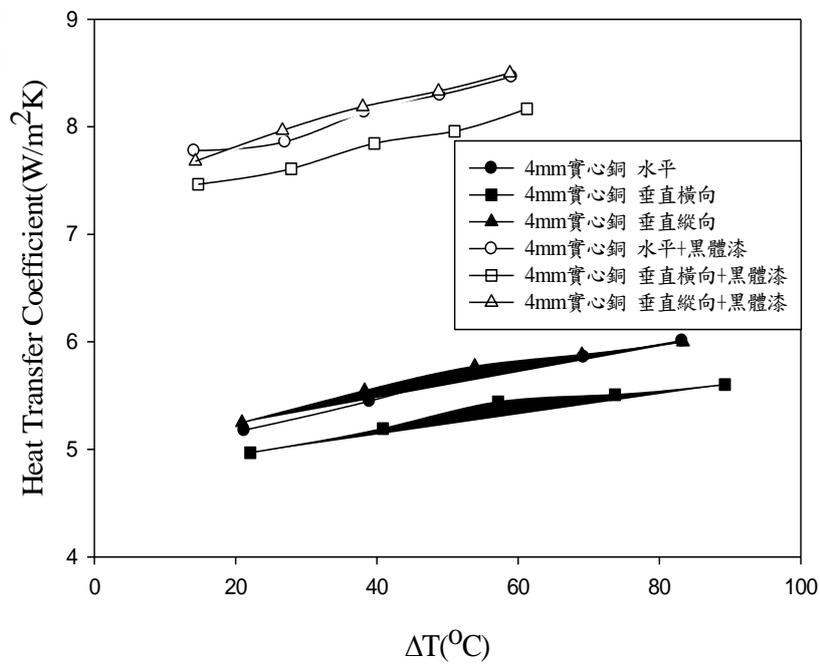


圖 3-9 4mm 樣本熱傳係數

第四章 結論與建議

4-1 結論

本研究利用發泡銅與銅底板結合，作為不同於傳統純銅或鋁合金的散熱鰭片，以實驗的方法來探討其自然對流的熱傳性能。所得的結論如下列敘述：

1. 由於發泡金屬的多孔性結構，使得空氣可以流入內部將熱帶走，所以在第一組實驗樣本中，6+4mm,50PPI 樣本的熱傳係數最高，其次是 6+4mm,35PPI 樣本，10mm 平板的最低。
2. 第二組實驗樣本中，表面全發泡樣本的熱傳係數最高。
3. 第三組實驗樣本中，角度對實驗的影響特別顯著，水平與垂直縱向放置的熱傳係數較高，垂直橫向放置的熱傳係數較低。10mm,10PPI 與 10mm,20PPI 樣本在水平放置的熱傳係數皆較高，其次是垂直縱向放置，垂直橫向放置的熱傳係數最低。在相同放置角度下，10mm,10PPI 樣本的熱傳係數皆較 10mm,20PPI 樣本的高，而在水平放置與垂直橫向放置時差異較明顯。
4. 發泡銅散熱鰭片的重量與同體積實心銅散熱鰭片相比，減輕

非常多。

5. 在自然對流中，熱輻射效應對熱傳係數的影響特別顯著。

4-2 建議

本實驗的參數為發泡銅的孔數率(PPI)與厚度，以後可以延伸探討的部分有如下列敘述：

1. 比較不同孔隙度(Porosity)(在固定孔數率下)的發泡金屬，對其熱傳性能的影響。
2. 設計不同幾何尺寸的發泡金屬散熱鰭片，希望能夠提升其熱傳性能。
3. 比較不同發泡材料(如發泡銅、發泡鋁、發泡碳、發泡不鏽鋼等)對其熱傳性能的影響。
4. 藉由可視化設備，觀察流體在發泡金屬的流動型態，並與傳統散熱鰭片的流場比較。

參考文獻

- [1] Reynell, M., (1990). "Advanced thermal analysis of packaged electronic systems using computational fluid dynamics techniques," *Computer-Aided Engineering Journal* 7(4): 104-106.
- [2] 陳勇勳，(2012)，泡沫金屬之淺論，全國高級中學小論文寫作比賽。
- [3] Chou, S. F. and Yang, C. H., (1993). "Heat transfer characteristics of aluminum foam metal,"
- [4] Lee, Y.C., Zhang, W., Xie, H., and Mahajan, R. L., (1993). "Cooling of a chip package with a 100 W, 1 cm super (2) chip," ASME, NEW YORK, NY,(USA).
- [5] Chao, C. H. and Li, J. M., (1998). Foam-metal heat sinks for thermal enhanced BGA package applications.
- [6] Bastawros, A. F., (1998). "Effectiveness of open-cell metallic foams for high power electronic cooling," *ASME HEAT TRANSFER DIV PUBL HTD 361*: 211-217.
- [7] Kim, S. Y., Paek, J. W. and Kang, B. H., (2000). "Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger,"

Journal of heat transfer 122: 572.

[8] Phanikumar, M. S. and Mahajan, R. L., (2002). "Non-Darcy natural convection in high porosity metal foams," International Journal of Heat and Mass Transfer 45(18): 3781-3793.

[9] Boomsma, K. and Poulidakos, D., (2002). "The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams," Journal of fluids engineering 124(1): 263-272.

[10] Boomsma, K., Poulidakos, D. and Zwick, F., (2003). "Metal foams as compact high performance heat exchangers," Mechanics of Materials 35(12): 1161-1176.

[11] Zhao, C. Y., Lu, T. J. and Hodson, H. P., (2005). "Natural convection in metal foams with open cells," International journal of heat and mass transfer 48(12): 2452-2463.

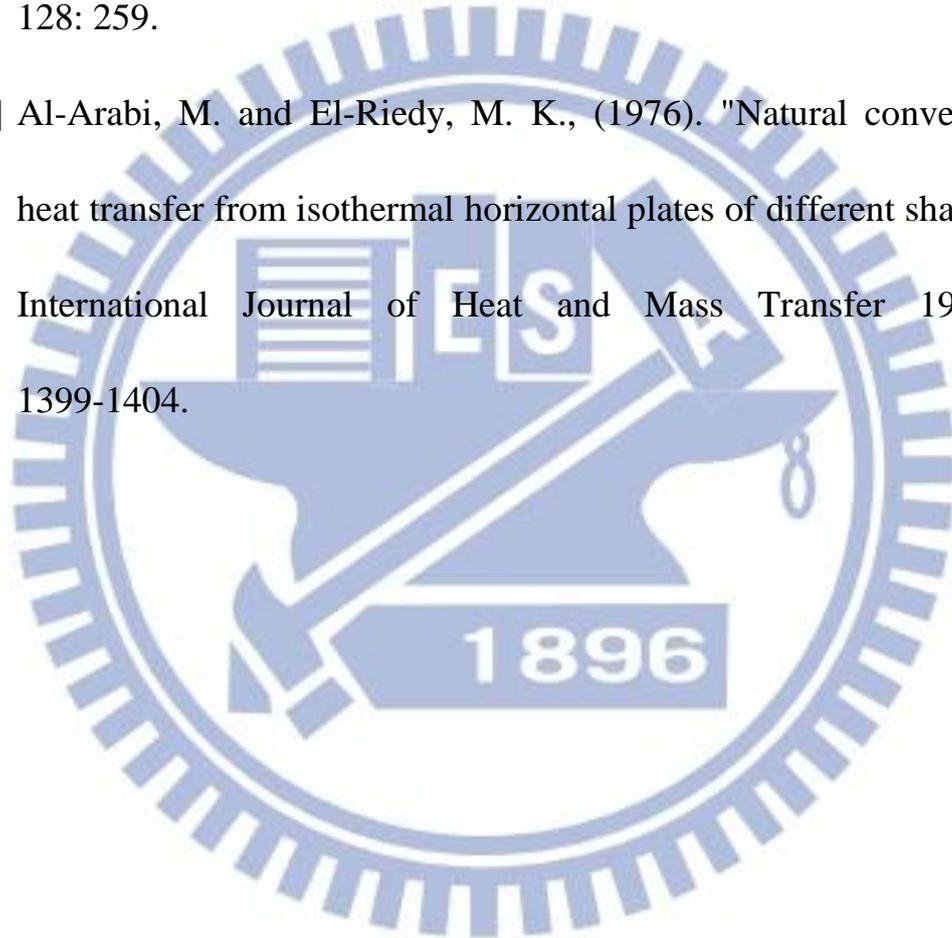
[12] Mahdi, H., Lopez, P., Fuentes, A., and Jones, R., (2006). "Thermal performance of aluminium-foam CPU heat exchangers," International journal of energy research 30(11): 851-860.

[13] Bhattacharya, A., Calmidi, V. V., and Mahajan, R. L., (2002). "Thermophysical properties of high porosity metal foams,"

International Journal of Heat and Mass Transfer 45(5): 1017-1031.

[14] Bhattacharya, A. and Mahajan, R. L., (2006). "Metal foam and finned metal foam heat sinks for electronics cooling in buoyancy-induced convection," Journal of electronic packaging 128: 259.

[15] Al-Arabi, M. and El-Riedy, M. K., (1976). "Natural convection heat transfer from isothermal horizontal plates of different shapes," International Journal of Heat and Mass Transfer 19(12): 1399-1404.



附錄、實驗誤差分析

實驗參數誤差的計算方法如下：

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial V_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial V_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial V_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

其中

W_R 為結果的不確定度。

W_1, W_2, \dots, W_n 為獨立量測變數的不確定度。

R 為獨立變數 (V_1, V_2, \dots, V_n) 的函數。

個別裝置的準確度

裝置	準確度
熱電偶 (Omegaclad T-type 0.8 mm)	0.1 °C
CNC 加工	0.03 mm
直流電源供應器 (GW-GPR 7550D)	3mA
功率計 (Yokogawa WT230)	± 0.1 %
Kapton 電熱片(千輔)	0.5 Ω