

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

應用奈米流體增強熱管性能之研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-050-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：陳炳輝

計畫參與人員：簡欣堂、張志偉、吳嘉和

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 5 月 27 日

應用奈米流體增強熱管性能之研究

Thermal Enhancement of Heat Pipe by Using Nanofluid as Working Medium

計畫編號：NSC92-2212-E002-050

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：陳炳輝 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：簡欣堂、張志偉、吳嘉和 國立台灣大學機械工程學系

一、摘要

熱管是一種具低熱阻的裝置，它是利用微小溫度差來傳送大量熱能的工具，目前熱管普遍應用於電器、電子零件的冷卻、太陽能或地熱、熱交換器的應用，更由於其具有質輕的特性，故可應用於太空冷卻系統中，其所能應用的範圍非常廣泛。而要增強熱管性能，主要從兩方面著手：第一種是藉由改善熱管內部毛細結構，延緩毛細極限的發生以提高熱管最大熱傳量；另一種是改採用熱傳遞效果較佳的工作流體，以提高熱管的整體熱傳性能。熱管的發展由來已久，內部毛細結構的設計也大致固定。所以如何開發更有熱傳效能的工質是相當重要的研究，目前熱管在CPU上導熱的應用以DI water為最主要的工作流體，而在奈米科技近年來逐漸受到學界及業界重視的同時，得以發現許多特殊的性質，使得提高工作流體的物理性質成為可能。如何應用奈米科技開創一個全新的熱傳應用的工作流體，是值得研究的一個重要課題。

固體金屬具有極佳的熱傳導性質，藉由在流體中適度添加奈米金屬粒子，可以提高流體的熱傳性質。若能有效應用此種奈米流體作為熱管的工作流體，則可提高熱管的效能，也才足以解決在電子元件有限的空間中，越來越大的散熱需求。

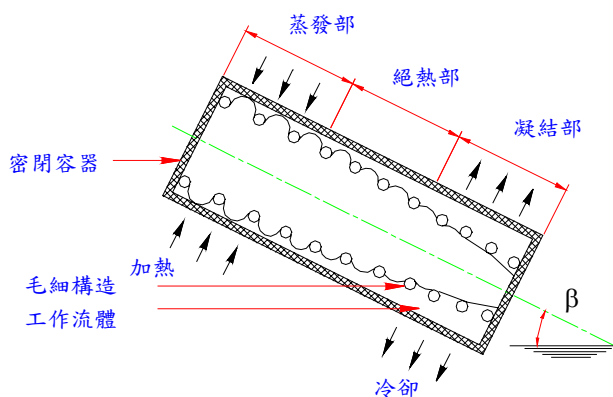
關鍵詞： 奈米流體、熱管性能增強、散熱元件

二、緣由與目的

隨著現今科技的日新月異，許多的儀器設備趨近於微小化，正如同最近幾年筆記型電腦的蓬勃發展，CPU的計算速率呈倍數成長，單位熱量密度的產生也急遽的增加，更帶動在微小空間內熱傳現象的分析與研究。由於電子元件及產品現今講究輕薄短小，而如何利用極小空間帶走極大的熱量就變成重要的研究課題，因此熱管在近年來被廣泛的使用，也帶動熱管的研究風氣。

熱管(Heat Pipe)是一種能夠在狹小空間當中，利用本身內部工作流體吸收釋放熱量產生相變化來做熱傳遞，由於熱管可以在微小溫差下輸送極大的熱傳量，因此有「熱之超導體」之美譽。熱管的構成要素有三大部份如圖一，即為密閉容器(container)、毛細構造(wick)及工作流體(working fluid)，其中密閉容器是提供熱管操作時的壓力環境，並可因為不同的工作環境而改變。毛細構造的功能是提供毛細力使工作流體從凝結部返回蒸發部，並使工作流體能在軸向方向上充分的潤濕加熱面上的管壁，不致產生有乾涸(dryout)或不均勻加熱的現象發生。依照熱管內部局部操作環境可將熱管區分為蒸發部(evaporating section)、絕熱部(adiabatic section)和凝結部(condensing section)三區域。當熱管受熱的時候，熱量由管壁傳入毛細構造，並使工作流體於液氣介面蒸發，隨著液體的持續蒸發，蒸發部具有較大的蒸汽壓力，迫使蒸汽流流經絕熱部至凝結部凝結成液態，而毛細構造提供毛細力使工作流體返回蒸發部，如此反覆的進行，即可以帶走相當大的熱量。由於熱管

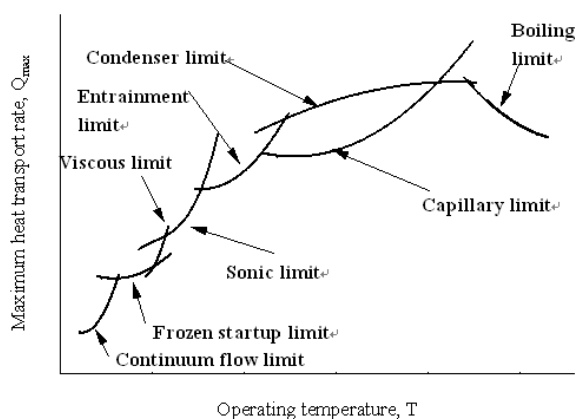
是藉由工作流體的蒸發凝結來大量的吸收及釋放熱量，故得知熱管能在極小的溫差下就能輸送極大的熱量。



圖一 熱管構造

熱管能帶走的熱量有其極限，在不同的操作溫度及不同的熱通量下，熱管的熱傳效果受到不同的物理現象所侷限。熱管的諸多熱傳極限如圖二所示。

現今熱管當中有許多是利用微溝槽來作為毛細構造，主要是發生蒸發及凝結相變化時，微溝槽的固體表面可以增加熱傳面積。同時以微溝槽作為毛細構造，不僅可以增加熱傳面積，也可以有效的推動工作流體從凝結端送至蒸發端。如果熱傳量超過本身微溝槽的毛細極限，亦即微溝槽所形成的毛細力無法克服內部流體的壓差將足夠的工作流體從凝結端推送至蒸發端的時候，就會發生乾涸現象(dry-out)，熱管也因而損壞。而發生熱管乾涸現象的另一個原因是沸騰極限，沸騰極限和熱管表面及氣泡成核有相當大的關係。沸騰極限發生的原因如下：熱管的徑向熱傳是通過管壁到毛細結構，當熱通量不斷增高時，致使液體的壓力小於液汽介面之飽和蒸氣壓，此時毛細結構會有蒸氣氣泡的形成，而阻礙了工作流體的回流，造成過熱區域。在蒸發端沸騰劇烈產生乾滯現象，這就稱為沸騰極限。其熱傳控制機制是在於蒸發端的垂直熱通量，因此最大熱傳極限和蒸發端區域面積相關。



圖二 不同工作溫度下的熱傳極限

在兩相熱傳的理論中，工作流體在液相要進入氣相時，此時會產生核沸騰現象發生，微小氣泡在管壁的粗糙表面成長成核。此時單相進入雙相的階段，蒸發端的熱阻會因此而減少。但是若成核的氣泡越長越大，此時的管壁熱阻會逐漸增大，乃是因為氣泡的熱阻較大所致[1]。因此，若探討瞭解工作流體中加入奈米級的顆粒，使奈米流體在蒸發段氣泡成核時，能透過奈米粒子撞擊成核氣泡，使尚未長大的氣泡迅速被帶離管壁孔穴表面，而這些被撞離的小氣泡和奈米顆粒在工作流體中會有更大的擾動效應，因此奈米流體在氣泡成核階段可以使氣泡成形較小，使氣泡迅速脫離管壁表面，如此將預期降低蒸發端之熱阻。另外，因為奈米流體有抑制氣泡成長的效能，使蒸汽氣泡不會阻礙流體回流的空間，所以在較高熱通量時，將會防止沸騰極限的產生，如此將奈米流體加入熱管中所預期的兩大優點：

1. 增加熱管的最大熱傳量。
2. 減少熱管蒸發端的熱阻。

而在學術研究的探討上，相變化(phase change)現象在熱流系統的設計中，是一個相當重要的研究領域，其應用領域包括冷凍空調、蒸發式冷卻(evaporative cooling)，電子組件散熱、航空、以及真空技術等，涵蓋範圍甚廣。在工程應用上，相變化熱傳本身是一個極有效率的散熱方法，不過由於相變化過程中的物理現象複雜，其熱質傳性能控制遠比純單相介質者困難，故一直是一個重要的研究課題。

在微尺度相變化現象的相關研究，目前可概分為兩個方向：一是在一般尺度空間中

的微尺度相變化問題，例如微汽泡、液滴的成核(nucleation)、以及膜狀凝結 (film condensation) 中之初成薄膜熱質傳現象等，一般成核長成直徑及薄膜厚度約從 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{m}$ 不等，故其仍歸屬於微尺度的現象。另一是則是在微容器或微流道中的相變化現象。例如，Peng 及 Wang[2]發現水在微流道中流動時，即使未產生汽泡，也可得到類似沸騰發生時的高熱通量。上述研究，顯示即使在微尺度下的相變化行為，都與巨觀尺度下者有非常大的不同，遑論奈米尺度了，因此奈米流體之熱傳性能值得學術界進行深度的研究與探討。

三、完成結果與實驗討論

性能量測方法

熱管的性能通常指能夠輸送最大熱流量的指標或對一定之熱輸送量的最小溫度差為另一指標值。前者稱為最大熱輸送量 Q_{max} ，後者稱為熱阻 R 。通常於測試時，使蒸發段溫度、絕熱段溫度與冷凝段溫度各為定值，在穩定狀態下測定，而影響性能條件有包含工作流體之種類、溫度等。

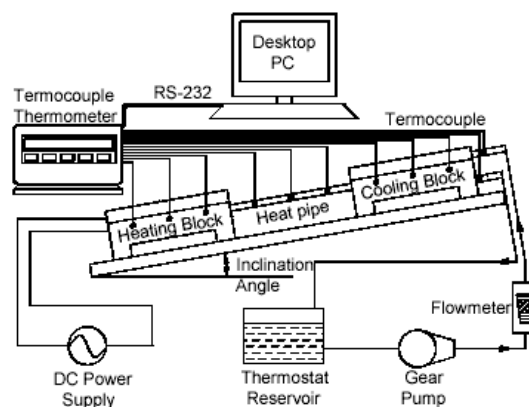
首先將利用 DI-Water 為工作流體做實驗，溫度量測以熱電耦(T type)作為量測工具。將經過一個熱電耦擷取溫度計來觀察其溫度變化的情形，並可以做溫度數據的紀錄及輸送到電腦做數據的處理。

實驗設備架設

量測熱管性能的設備如圖三所示。熱管可分為蒸發端、絕熱端及冷凝端，實驗量測前先在熱管上不同位置黏貼熱電耦以量測溫度值，以熱電耦擷取溫度計同時擷取這些點的溫度值。在蒸發端、絕熱端及冷凝端各黏上兩根至三根的熱電耦，為避免量測誤差，將各區量得的溫度值分別平均並記錄。熱管量測設備也區分為加熱部分跟冷凝部分：加熱部分由隔熱材料包覆熱管蒸發端及金屬加熱棒，降低熱損失，熱量由直流電源供應，可經由控制電壓大小，換算出輸入的熱量；冷凝區以冷卻水套包覆熱管冷凝區，提供熱交換的機制，藉由量測進出水口的溫度差異以及冷卻水的質量流率，即可算出冷卻水套的散熱

量。熱管中間的絕熱端則以絕熱泡棉包覆，將熱損失降至最低。

待整個實驗設備狀況恆定之後，即可開始進行量測。首先提供固定加熱功率於熱管蒸發端，調整適當的冷卻水流率，待整個系統達至穩態，溫度不再變動即可記錄各點溫度值，這樣即完成一個加熱功率的量測步驟。然後提高加熱功率，再次進行溫度量測。如此不斷重複，直到加熱端溫度值快速上升，且不會隨冷卻水流率提高而下降時，表示加熱功率以超過熱管的最大熱傳量，記錄此最大熱傳量後切斷加熱電源，待熱管冷卻後即可拆卸，完成此根熱管性能的量測實驗。



圖三 量測熱管性能之設備圖

本實驗將利用 DI-Water 及五種不同顆粒尺寸(編號：A、B、C、D、E)的奈米金水溶液為工作流體進行比較，這五種奈米金水溶液的製作配方如下表一。

Condition	Na ₃ Citrate (ml)	Tannic Acid (ml)	HAuCl ₄ (ml)
A	0.2	2.5	3
B	0.2	5	6
C	3	0.1	1
D	3	2.5	6
E	3	0.1	3

表一 奈米金水溶液配方

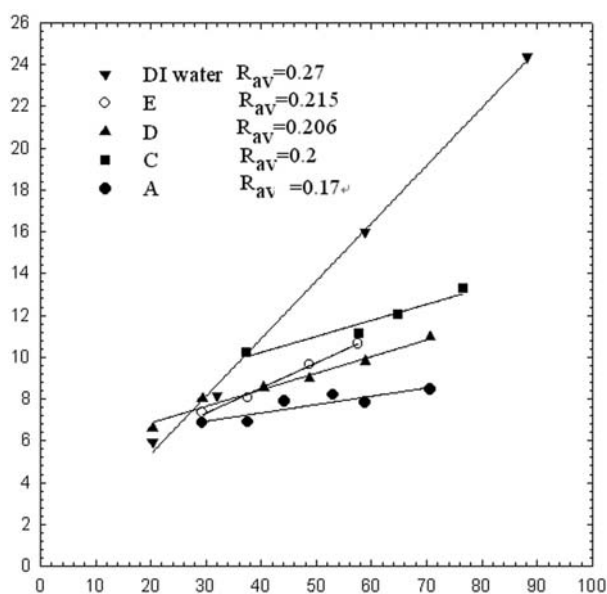
這些奈米金水溶液內奈米金顆粒的分佈情形可由穿透性電子顯微鏡(TEM)下觀

察，這五種奈米金顆粒TEM圖片見附錄圖一。

附錄圖中(A)的奈米顆粒平均大小約21.3 nm，而圖中(B)的奈米顆粒平均大小約43.7 nm，(C)、(D)和(E)的平均粒徑分別為8 nm、25 nm和28 nm。由附錄圖可看出，(A)、(B)的奈米金顆粒分散效果較佳，(C)、(D)和(E)則明顯有顆粒聚集的情形，但容易尚未發生沈澱的現象，仍可以進行熱管充填測試。將五種奈米金水溶液在室溫下靜置一週，確定其分散效果穩定，在進行充填測試的步驟。溶液(B)在靜置後產生沈澱的現象，表示奈米金顆粒的分散保護效果不佳，無法充分顯示奈米流體的特性。而沈澱亦會造成熱管毛細結構阻塞，將會大大降低熱管的熱傳輸效能，甚至比單純DI water的熱傳效果更差，所以不列入考慮比較。

實驗結果

將DI water與奈米金水溶液(A)、(C)、(D)、(E)充填入直徑6mm熱管當中，進行熱管效能測試，結果如下圖四所示。



圖四 不同奈米顆粒大小下熱管之熱阻值

奈米流體(A)、(C)、(D)和(E)的熱阻值分別為0.17、0.2、0.206和0.215°C/W。使用方式(A)，所得的熱阻值比用純水當作工作流體所得的熱阻值整整降低37%，使用方式(C)、(D)和(E)所得的熱阻值也有明顯的

降低，其降低的幅度分別是25%、23%和20%。

因為溶液(E)所得的奈米顆粒大小較用溶液(C)和(D)來的大，且溶液(E)有較明顯的聚合現象，所以(E)的熱阻就明顯的比其它兩個方式來的高，這可能造成的原因是由於粒子集結後於沈積或滯留於熱管內網篩的表面及內管壁，產生了沸騰抑制的現象，使得應用於熱管的效能降低許多。另外可能的原因是網格狀的毛細網目有阻塞現象，造成冷凝流體回流的效果變的較差所致。除此之外，使用溶液(E)的奈米流體，所實驗的熱管在熱功率於58W之後，就造成乾涸(Dry out)的現象，這有可能是聚合的粒子阻礙了流體流動，而使蒸發端的流體無法順利流回凝結端。

奈米金粒流體之所以能有比純水更低的熱阻值，也就是有更佳的散熱效能，原因可能是因為熱管於蒸發端裡，其熱阻主要是在液氣介面的氣泡所構成，而較大的氣泡成核大小或成長的氣泡較大，將會製造了較大的氣態熱阻層，而阻礙了從固體表面到液體的熱傳遞。而在懸浮的奈米顆粒會朝蒸汽氣泡撞擊，因此這樣流體在有奈米顆粒懸浮時，將被預期有較小的蒸汽氣泡成長，並且氣泡會被顆粒擊散的可能，如此的現象因此而增加沸騰時的擾動效應，此機制將有助於熱傳的增強與降低熱阻值 Huang(1998)。另外一個原因在於，冷凝端和絕熱端的冷凝流體，因為於液相流體於毛細結構中回流有熱對流的產生，而顆粒的在流體中扮演的是類似在巨觀尺寸下的固體顆粒，當在液固混合流體中，固體顆粒對流體熱傳效應有影響。尤其有超小顆粒的流體流動時，無論在布朗運動效應或擴散效應上，都對熱傳效能具有相當的影響。在 Xuan(2003)[3]的研究中有論述兩種增加熱對流傳輸的增益原因，其中研究者認為，雖然奈米顆粒尺寸極為小，但是顆粒與流體之間的速度應還不為零，有就是顆粒與流體之間有所謂的滑動速度的產生。而分散與活動的奈米顆粒將有助於擴散熱能的效能。另外，分散的的顆粒，將有助於流體在溫度場分佈的平坦化，也造成管壁與流體間的邊界層溫度差的陡升，因此而增強了其熱對流係數。所以冷

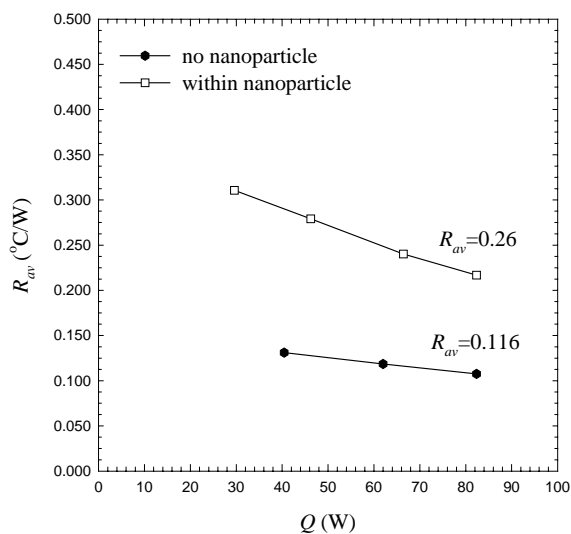
凝端在流體回流得過程當中，奈米顆粒也提供了相當熱傳效能的提升，有效降低蒸發端或冷凝端的熱阻值，如表二所示，增強的效應大約 10% 至 20%。

Working Fluid	R_{evap} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{cond} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
DI Water	0.126	0.144
E	0.085	0.13
D	0.08	0.126
C	0.066	0.134
A	0.055	0.115

表二 不同流體蒸發端及冷凝端之熱阻

總和上述之原因，應用於傳統熱管之奈米流體，將可造成較佳的兩相熱傳性能。基於上述，分散性好、粒子較小的奈米粒子所提供奈米流體有較低的熱阻值。且在實驗中，有奈米金流體之熱管其熱阻值也較純水來的低。

由於奈米金水溶液中除了奈米金顆粒之外，還有將奈米金還原的還原劑成分，所以有必要作一組對照實驗，確認還原劑對熱管熱傳效能的影響。以相同濃度等量的還原劑水溶液作為熱管工作流體進行熱管測試，結果如下圖五所示。

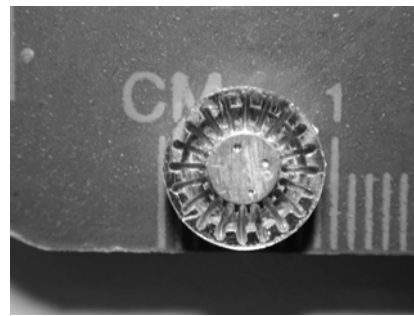


圖五 還原劑水溶液與奈米流體的熱阻比較圖

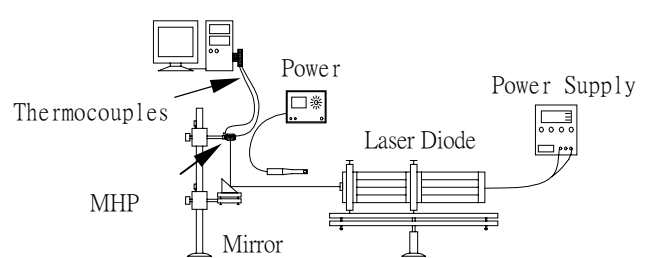
由上圖五所示，有奈米金粒流體和只有還原劑成分，也就是不含有奈米金粒的流體，在微溝漕熱管中的熱阻變化。由數據得知，有奈米金粒流體的熱阻比無奈米金粒流體的熱阻為低約一倍以上。因此有還原劑但無奈米金粒的溶液其熱阻值比純水的熱阻值大，推測單純還原劑溶液將使熱傳的效果變差，而奈米金顆粒對熱管的熱傳應有正面提升的效果。

微型碟狀熱管測試

除了傳統圓形熱管的測試之外，我們同時也將奈米流體應用於微型碟狀熱管 (Disk-shaped Micro Heat Pipe, DMHP)，如下圖六所示，進行效能測試。DMHP 測試設備如圖七所示。

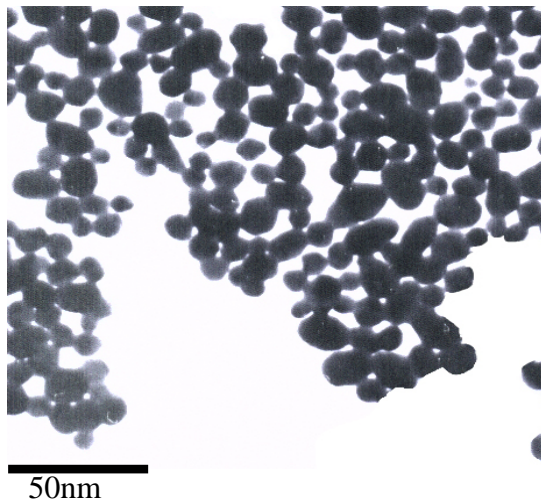


圖六 微型碟狀熱管實體模型



圖七 DMHP 測試設備

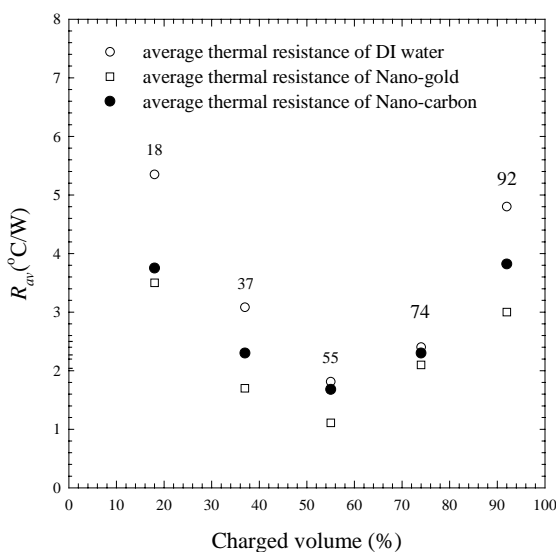
在實驗中，我們使用三種工作流體進行測試。分別是 DI water、20nm 濃度為 0.01% w/v 奈米金水溶液(TEM 照片如下圖八)，以及奈米碳球水溶液(TEM 照片如下圖九)。測試結果如圖十所示。



圖八 奈米金粒 TEM 圖放大倍率 200,000



圖九 奈米碳球 TEM 圖倍率 100,000



圖十 不同填充量下，不同加熱功率和熱阻關係圖

在使用奈米金粒流體在填充量為 18、

37、55、74、92%，DMHP 中被量測出的熱阻是 3.5、1.7、1.1、2.1 和 3.05 °C/W。熱阻分別比純水小為 35、45、40、13 和 36%。由實驗數據發現在 DMHP 中奈米金粒流體的最佳填充量是 55%。另外，在使用奈米金溶液之量測熱阻平均比水低 34%。

奈米金粒溶液在量測熱阻較低的原因解釋如下：DMHP 之量測熱阻較小，表示在使用奈米金粒流體時，所造成的熱傳效能較高，其主要原因在於，DMHP 的熱阻主要是在液氣介面的氣泡所構成。而較大的氣泡成核大小或成長的氣泡較大，將會製造了較大的熱阻，而阻礙了從固體表面到液體的熱傳遞。而在懸浮的奈米顆粒會朝蒸汽氣泡撞擊，因此這樣在有奈米顆粒懸浮時將被預期有較小的蒸汽氣泡成長，並且氣泡會被顆粒擊散的可能，因此而增加沸騰時的擾動效應，如此的機制將有助於熱傳的增強與降低熱阻值。

如此的熱傳效應與奈米顆粒的影響，Huang(1998)等人亦有提到的，在固體顆粒在流體的沸騰影響，其中顆粒會停留在發熱表面上，使的妨礙氣泡離開發熱表面及水冷卻發熱表面，並使熱傳降低，應該不會發生，因為其研究為微米顆粒較大且有分散性的問題，本實驗中奈米顆粒較小且具有較佳的分散能力，因此不易沈澱，所以不易造成此熱傳抑制的現象。

而有奈米碳球流體之熱阻在填充量 18、37、55、74 和 92% 時，分別為 3.75、2.3、1.6、2.3 和 3.82 °C/W。另外在 DMHP 測試中，奈米碳球流體之最佳填充量亦是 55%。使用奈米碳球溶液時，在 18、37、55、74 和 92% 的填充量的熱阻分別比水低 30、25、11、4 和 20%。

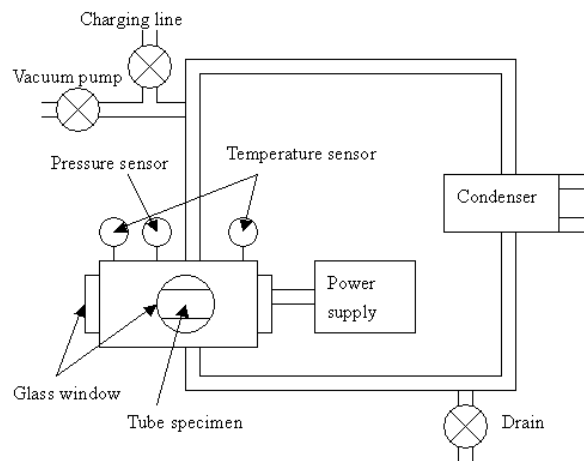
而由圖十所示，說明了在任何填充量之下，顯示奈米金粒流體之熱阻值皆比奈米碳球流體低。可能的原因在於，因為奈米碳球顆粒大小較奈米金粒大，而且由圖八與圖九來比較，奈米碳球又有明顯的聚合現象，所以使用奈米碳球之流體有較高的熱阻。其可能的原因在於，奈米碳球流體，夾雜奈米碳球與奈米碳管等不均勻顆粒且大小尺寸不一，並且奈米顆粒也造成明顯的聚合現象，因此在 DMHP 中的微溝漕和管壁結構上，發生沸騰現象時產生了

些許的變化，由於聚合的顆粒和長形碳管可能阻礙了表面和微溝漕沸騰的效應，使的熱傳遞效能變為較差，也因此使的奈米碳球流體的熱阻值於 DMHP 中，會比奈米金粒流體來的要大。

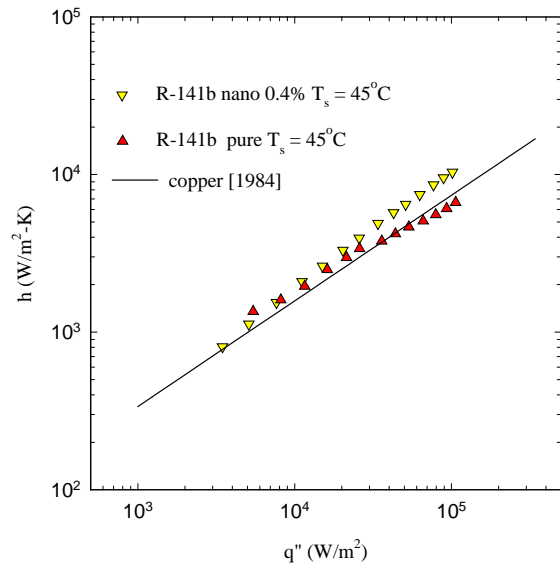
因此，有較小較均勻分佈的奈米金溶液比較大顆粒的碳球有較低的熱阻。而這個研究結果也說明了在 DMHP 中使用奈米金粒流體或奈米碳球流體都比水的熱阻還低。

奈米冷媒沸騰實驗

奈米顆粒除了可以均勻分散於水溶液中，也可以分散於冷媒當中以提高冷媒的熱傳效果。由於冷媒的沸點較低，作沸騰實驗較容易，目前先採用內含 20nm 金奈米粒子、濃度為 0.4% w/v 奈米冷媒為流體作沸騰實驗沸騰實驗設備如下圖十一所示。量測奈米冷媒的沸騰熱傳係數，結果如下圖十二所示。



圖十一 沸騰實驗設備圖



圖十二 奈米冷媒在不同熱通量下之熱傳係數

由圖十一所示，縱軸為熱通量，橫軸為管壁的過熱溫度與流體的飽和溫度差，其斜率為沸騰熱傳係數。在平滑管中，無論在任何熱通量時，所得到的熱傳係數都比純冷媒來的高，在熱通量愈高時，其熱傳係數增強有愈高的趨勢。奈米流體之熱傳係數平均增加約為 30%。

四、計畫期中成果自評

1. 利用化學還原方式製作奈米流體，已能藉由控制添加的還原劑量，有效製作各種不同顆粒尺寸的金奈米流體，並使之均勻分散於水溶液中而不致產生沈澱現象。
2. 以奈米流體作為熱管內之工作流體，測試的結果顯示，奈米流體的確可以增強熱管的熱傳效果。不同的顆粒尺寸也會有不同的增強效果，不過大致上顆粒越小，熱傳增強的效果越明顯。
3. 本計畫所製作的奈米流體可透過技術移轉給廠商，應用於熱管或其他電子元件散熱裝置中充當工作流體。
4. 除了傳統熱管的應用測試，為了因應

電子元件散熱微小化的趨勢，也將奈米流體應用於微型碟狀熱管(DMHP)中，和使用 DI water 作為工作流體比較起來，奈米流體仍舊提供了較佳的热傳效能。

5. 而為了要充分瞭解奈米流體增強熱傳效果的原因，需要對奈米流體的性質或物理現象作進一步的研究，比較奈米流體與一般流體的接觸角、黏滯係數或池沸騰現象有何差異。
6. 若能有效控制製程參數使奈米顆粒均勻分散於冷媒而不聚結沈澱，就有機會把奈米冷媒應用於一般的冷凍空調系統中，大幅提高奈米流體應用的範圍。
7. 研究奈米流體的池沸騰現象，需要搭配流場觀測設備以觀察奈米流體的氣泡成核現象及氣泡成長機制，後續將會利用 PIV 進行流場觀測，比較與純水的池沸騰現象的異同，推測奈米流體影響沸騰現象可能的機制。
8. 在對奈米流體有較多瞭解之後，期望能找出影響奈米流體熱傳增強的參數，比較這些參數的重要性或相關性，從而找出奈米流體最佳化的條件。

成果列表：

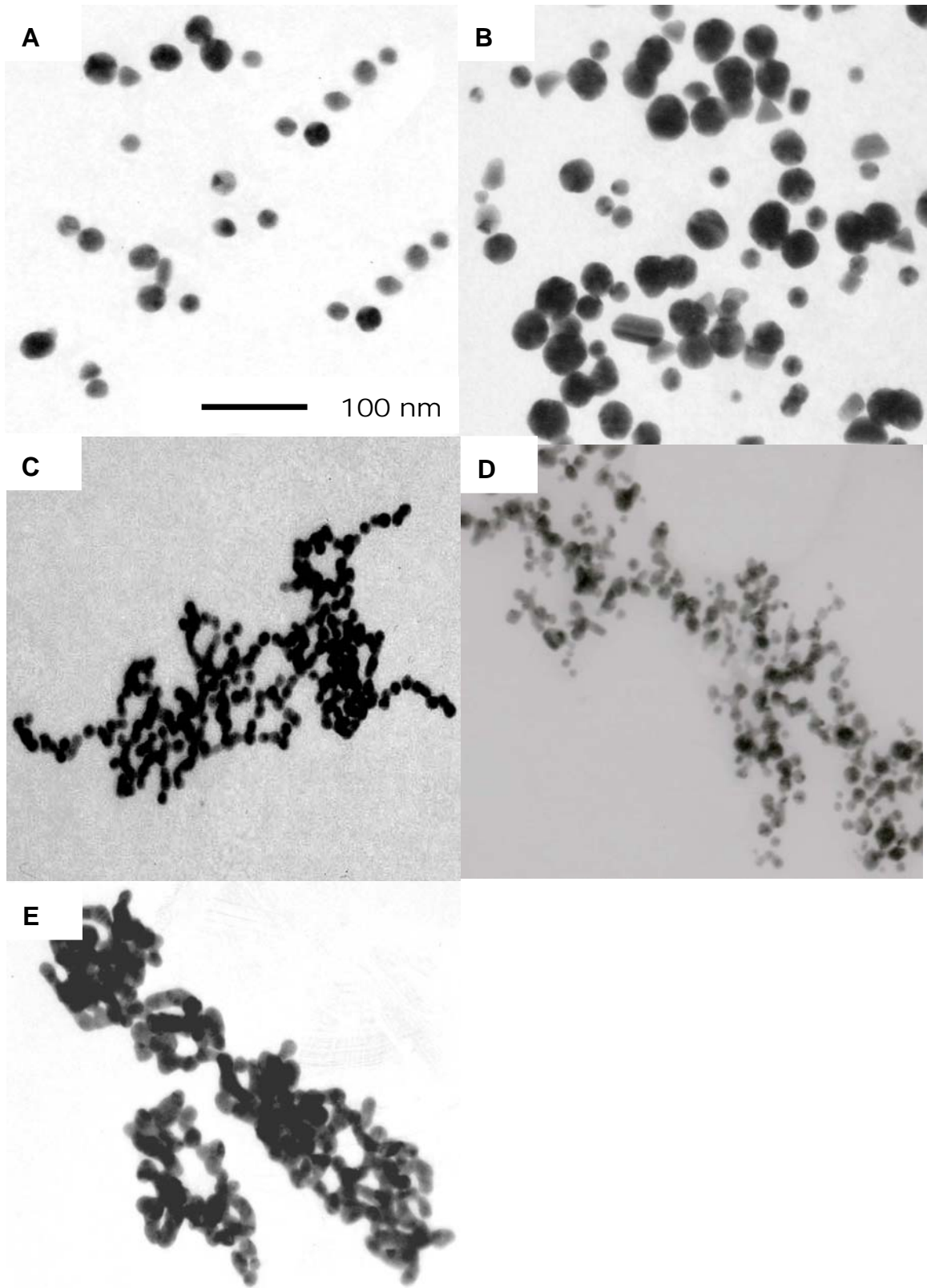
預期完成之工作項目	執行情形	差異性
1. 研究奈米金屬粒子之製作流程與製程參數	已建立化學還原法製作奈米流體的流程及參數參數。並能有效控制顆粒大小。	無
2. 製作奈米流體	成功製作不同尺寸的奈米金顆粒，且有效分散於 DI water 和 R-141 冷媒中。	無
3. 測試微型碟狀熱管之熱傳效能	將奈米金水溶液充填入微型碟狀熱管並測試熱傳	無

	效能。	
4. 設計與製作池沸騰實驗量測設備	池沸騰設備架設完畢。	無
5. 進行奈米流體之池沸騰熱傳實驗量測	測試奈米冷媒的池沸騰熱傳係數，之後將測試多種不同尺寸及不同濃度的奈米金水溶液的沸騰熱傳係數。	無
6. 以傳統熱管作奈米流體熱傳效能量測	目前先以直徑 6mm 的熱管進行奈米流體熱傳效能測試，之後再對不同尺寸或不同結構的熱管進行測試。	提前進行部分第二年之計畫內容。

另外，本計畫執行過程預計會投稿一篇 SCI 論文及一篇國際會議期刊。

五、參考文獻

- [1] J. G. Collier, and J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*, Clarendon Press., Oxford, 1996
- [2] X. F. Peng, and B. X. Wang, "Boiling characteristics in microchannels/microstructures," The Eleventh International Symposium on Transport Phenomena ISTP-11, Taiwan, November 29-December 3, 1998
- [3] Y. Xuan, and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 43, pp. 3701-3707, 2000
- [4] G. P. Peterson, "An introduction to Heat Pipes modeling, testing, and applications"
- [5] 邱琇苓, "創新雷射二極體之封裝基材", 國立臺灣大學碩士論文, 民國九十一年六月。



附錄圖一 不同配方下對奈米金粒大小的影響 TEM 圖(100,000)