

# 高功率平板式熱管之研究

計畫編號：NSC 88-2212-E-002-026

執行期間：87年8月1日至88年7月31日

計畫主持：陳瑤明（國立台灣大學機械系）

## 摘要

本文主要針對燒結式微熱管之性能作測試研究。首先，在理論計算方面，對於外徑3mm之熱管，操作溫度在50~100時，計算在熱傳量方面的各種限制之影響。不同的限制包括毛細限、聲速限、黏滯限、攜帶限及沸騰限，發現在本文選定工作狀況下其聲速限、黏滯限、夾帶限及沸騰限等，不會呈現顯著地影響。而最大熱傳量主要受制於毛細限。根據一維理論分析之毛細限，選定燒結層厚度及注水量，作最大熱傳量及最小熱阻之計算。在燒結層的影響方面：當厚度增加時，在同樣的操作溫度下，會增加最大熱傳量，但同時也會使熱阻變大；在注水量的影響方面：注水量有一適當範圍，過多或過少的注水量皆會降低最大熱傳量。在實驗方面，運用理論計算結果，選定接近最大熱傳量及最小熱阻之設計範圍，實作熱管，再進行性能測試。結果發現，燒結層厚度加厚可提高熱傳量，卻也升高熱阻，與理論計算相符；同時在注水量方面亦顯示與理論計算有相同趨勢。在設計熱管時，適當選用燒結層厚度與注水量，可在最大熱傳量與最小熱阻間，可取得一最佳熱管性能。

關鍵詞：電子冷卻、熱管

## 前言

隨著微電子工業製造技術的進步，微電子組件之性能大幅提高，同時體積縮小，這也使得這些電子組件具有相當高的功率密度。因此，高功率密度電子組件冷卻技術之研究與發展，有相當的必要。而筆記型電腦內，所有高功率密度電子組件均置於一個小空間內，此方面冷卻技術需求有更高的急迫性。

目前筆記型電腦所採用的微處理器冷卻方式，大體上仍以風扇/熱涵式為主。風扇冷卻方式有耗電、轉動件損壞、噪音、高熱阻、低功率密度等缺點。熱管冷卻方式無上述缺點，因而將成為下一代筆記型電腦所採用的微處理器冷卻方式。市面上雖已有較低熱量傳輸溝槽型或網目型管蕊熱管，然在燒結型熱管方面仍有極大值得開發之空間，國內對此方面之研究與開發仍十分缺乏尤其有關燒結銅管之製造技術仍有待加強。

熱管工作原理如圖(1)(Chi, 1976)基本上乃利用熱源產生之熱在熱管的一端(蒸發端)，將管內液體蒸發，所產生之蒸氣由於壓差流向熱管另外一端(冷凝端)，由於此端溫度較低，蒸氣於是冷凝同時釋放潛熱。冷凝後之液體藉由毛細壓差經蕊返回蒸發端。熱管即藉由此一閉路兩相系統，能在小溫差範圍下迅速地將熱傳到遠處。由於其構造簡單及高傳導性能等優點，早已應用於各不同領域中(Peterson, 1994)。

## 文獻回顧

有關熱管在微電子組件冷卻之應用上已有多方報導。Cotter(1984)首先提出微熱管(Micro heat pipe)在半導體原件之應用實例。他使用微機械加工之熱管進行實驗，並對所謂微熱管下定義。Peterson et al(1991)針對方形溝槽式微熱管進行測試與分析。他們報導所測試微熱管功率密度為 $4W/cm^2$ ，晶片最高溫度減低約 $11^\circ C$ ，同時提高有效熱傳導性約25%。Peterson et al(1993)再度針對三角形溝槽微熱管進行實驗研究，發現此一型熱管能提高有效熱傳導性81%。Gerner et al(1992)研究微熱管特性，探討理論最高熱傳能力(Maximum heat transport capacity)及各種重要影響因素，包括毛細限制(Capillary limit)、聲速限制(Sonic limit)、夾帶限制(Entrainment limit)、黏滯限制(Viscous limit)等。由其研究發現微熱管應有潛力以極微溫差傳送熱通量10至 $15W/cm^2$ 。Howard and Peterson(1995)測試陣列熱管(外徑3.175mm)，作用於加熱面上。冷卻端加鱗片，並施以空氣強迫對流。他們測得單一熱管之

熱阻為 $2.51K/W$ ，而熱管陣列之功率密度達 $7.75W/cm^2$ 。Xie et al.(1996)針對筆記型電腦散熱，加入熱管作冷卻手段，指出其為十分有效之方法。Cao et al.(1997)針對熱管管內環境，作高精度之工質填充及高真空裝置之設計建議。Kobayashi et al.(1998)運用熱管加鋁鎂合金作散熱研究，已能更有效地將筆記型電腦之發熱帶出至機殼外。從以上文獻分析得知，在微電子冷卻應用及筆記型電腦散熱運用上已有許多研究文獻。而在有限空間傳熱之熱管內流力、熱傳行為，包括傳導、對流、沸騰、冷凝等此一方面的研究請見回顧性文獻報導，如(Duncan and Peterson, 1994)。

## 研究目的

本文之目的將針對具燒結管蕊熱管，進行理論分析，選定燒結層厚度及注水量，作最大熱傳量及最小熱阻之計算。在實驗方面，運用理論結果，選定接近最大熱傳量及最小熱阻之設計範圍，實作熱管，再進行性能測試。

## 裝置與方法

研究方法主要以理論分析為主，實驗為輔，首先考慮各種限制(毛細、聲速、夾帶、黏滯等)，找出燒結後最佳孔隙率所需之銅粉顆粒大小，最佳工質填充量，以選取適當的燒結銅粉，及最佳燒結厚度之建議。

據此，接著進行實際的銅管燒結，然後清洗、填充工質，再測試所設計的熱管之性能，包括最高熱傳能力及熱傳導性。測試系統示意圖如圖(2)所示。此一測試系統乃由五部分所組成，包括測試架、可變電熱源、恆溫冷卻裝置、數據處理系統、真空設備測試架主要乃支撐熱管及冷卻水套。冷卻系統尚包括冷水迴路、冷凍機、幫浦。加熱源則使用直流電源供給器加熱片狀加熱器。加熱功率之量測主要靠電壓計與電流計。熱電偶將被用來量取熱管溫度分佈，包括蒸發段、絕熱段、冷凝段。除此之外，冷卻水進、出口溫度及環境溫度亦將被量測。所有量測訊號將以一數據處理器加以記錄監控。為減低熱對流效應，測試段將裝設在一真空槽內。所欲測試之熱管(其外徑3mm、燒結層厚度0.5mm、長度180mm)，其蒸發段面積與筆記型電腦之微處理器同。熱管材質為銅，管內工質為水。

## 結果討論

判斷熱管性能之兩大指標為操作溫度下的最大熱傳量與熱阻。一根製作良好的熱管必須滿足高熱傳量和低熱阻這兩個條件。

## 各種限制之效應

熱管理論的最高傳熱能力，主要受到五個限制的影響

(Chi, 1976; Peterson, 1994)：毛細限制、聲速限制、夾帶限制、黏滯限制和沸騰限制。吾人選定之熱管為銅與水組成，在溫度範圍 0 ~ 100 °C 具有良好的相容性及穩定性。根據一維理論計算的結果，在選取的溫度範圍內 (0 ~ 100 °C)，影響熱傳能力的五個限制其隨著溫度之變化如圖 (3) 所示，由圖中顯示聲速限制、黏滯限制和沸騰限制皆遠離操作範圍，不必考慮，而夾帶限制在本文選定之熱管條件 16W, 60 ~ 100 °C 工作條件下，為次要的影響限制。毛細限制為最主要的限制，所以本文熱管設計時，必須考慮毛細限制進行理論計算，進而取得燒結熱管製作的各種參數的規範範圍，求得最大熱傳與最小熱阻間相互妥協下的燒結厚度及注水量，以提供實作熱管之參考。

#### 熱傳量與燒結層厚及熱阻之關係

影響毛細限制的因素有：操作溫度 (工質的性質)、銅管內徑、銅粉粒徑、燒結層厚度、燒結層的孔隙度。當操作溫度及銅管內徑決定之後，可變的參數只剩銅粉粒徑、燒結層厚度、燒結層的孔隙度，其中孔隙度必須在燒結後量測才能得之，故先預設為一定值，由填粉過程來使其儘量固定。圖 (4) 分別就不同粒徑的銅粉，作燒結層厚度變化的毛細限制之理論計算。結果可以發現：雖然是不同的粒徑分布，但是由毛細限制所求得的理論最大熱傳量都落在燒結層厚度為 0.5 mm 附近。

理論熱阻值的計算，因為管壁與蒸氣流動的熱阻較小，所以主要決定於燒結層與操作溫度 (工質的性質)。選定操作溫度後，只需考慮燒結層的影響：厚度及孔隙度。當孔隙度固定時，厚度愈大，熱阻值也愈大。熱阻與燒結層厚度的關係同樣以圖 (4) 表示。在其它參數固定時，燒結層厚度對熱傳量與熱阻值的影響很大，但是兩者的趨勢並不一致，所以在選擇燒結層厚度時必須在兩者之中取得平衡。吾人先選定在熱傳量最大值的燒結層厚度，接著評估最小熱阻之恰當性，尋求整合後之最大熱傳量與最小熱阻之參考值。當各種參數皆固定後，進行注水量之計算，圖 (5) 為計算之結果，發現水量過多太少對熱管性能的影響十分明顯，故而準確填入適當注水量的過程及工具必須嚴格控制。

#### 實作熱管

在實作熱管方面，除了理論計算所改變的參數之外，還要考慮到模具設計及填粉過程。吾人初步選定的燒結層厚度為 0.5mm，可以得到接近理論預測的最大熱傳量，然此厚度的熱阻值較大。在理論計算中銅粉粒徑愈大則熱傳量愈大，但是考慮熱管的幾何尺寸，所以選取的銅粉粒徑為 80  $\mu\text{m}$ 。在本文中實作熱管的各個參數為：操作溫度為 60 °C、銅管長度 180mm、外徑 3mm、壁厚 0.3mm、燒結層厚度 0.5mm、銅粉粒徑 80  $\mu\text{m}$ 、孔隙度為 50%。根據上列參數的一維理論計算結果為：毛細限制 17.5W，熱阻為 1.34 °C/W。

熱管的製作過程為—首先將填粉完畢的銅管放入燒結爐中，控制溫度在 850 °C，同時充入氬氣下燒結 30 分鐘 (氬氣為還原氣氛，可以保護銅粉在燒結時不會因高溫而氧化)，冷卻後取出，先經過清洗、鍍好一端後，再利用真空注水系統作工質的填充，最後封鍍另一端，即完成熱管的製作，如圖 (6) 為本文實作之熱管。

將熱管置於測試系統上進行測試，本文量測之蒸發端與冷凝端各為 5cm，其餘部分為絕熱區，蒸發端置於加熱器上，冷凝端利用冷卻水套進行冷卻；使用熱電偶來量測溫度。測試的結果如圖 (7) 所示。而在操作溫度 60 °C 時，最大熱傳量為 12W，而熱阻為 1.74 °C/W。與理論計算相比，尚有一段差異，然理論計算仍可提供熱管實作時之初步設計參考。

#### 結論

本文針對外徑 3mm、燒結層厚度 0.5mm、長度 180mm、熱管材質為銅，管內工質為水之熱管作理論計算與實作測試，。研究方法主要以理論分析為主，實驗為輔，首先考慮各種限制 (毛細、聲速、夾帶、黏滯等)，找出燒結後最佳孔隙率所需之銅粉顆粒大小，最佳工質填充量，以選取適當的燒結銅粉，及最佳燒結厚度之建議。

本文結論如下列四點

1. 由理論計算預測得知聲速限制、夾帶限制、黏滯限制和沸騰限制影響不大，毛細限制為最主要的限制。
2. 依毛細限制，進行燒結層厚度與熱阻對熱傳量關係之計算，發現燒結層厚度愈厚，熱傳量愈大，同時熱阻也愈大，在二者之間可找出一最佳燒結層厚度。
3. 當各種參數皆固定後，進行注水量之計算，發現水量過多太少對熱管性能的影響十分明顯，故而準確填入適當注水量在熱管之製造過程有其必要性。
4. 實作之熱管性能與理論計算值仍有一定差距，顯示製程尚有改進之空間。

#### References

- A. B. Duncan, and G. P. Peterson, "Review of Microscale Heat Transfer," ASME, Journal of Appl Mech. Rev, Vol.47, No.9, 1994, pp397-427.
- A. H. Howard and G. P. Peterson, "Investigation of a Heat Pipe Array for Convective Cooling," ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.117, 1995, pp208-214.
- B. H. Kim and G. P. Peterson, "Analysis of the Critical Weber Number at the Onset of Liquid Entrainment in Capillary-Driven Heat Pipes," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.38, No.8, 1995, pp1427-1442.
- B. R. Babin, and G. P. Peterson, "Experimental Investigation of a Flexible Bellows Heat Pipe for Cooling Discrete Heat Sources," ASME, Journal of Heat Transfer, Vol.112, 1990, pp602-607.
- B. R. Babin, and G. P. Peterson and D. Wu, "Steady-State Modeling and Testing of a Micro Heat Pipe," ASME, Journal of Heat Transfer, Vol.112, 1990, pp595-601.
- D. Wu, and G. P. Peterson and W. S. Chang, "Transient Experimental Investigation of a Micro Heat Pipe," AIAA, Journal of Thermophysics, Vol.5, No.4, 1991, pp539-544.
- G. P. Peterson, "Modeling, Fabrication, and Testing of Micro Heat Pipes: An Update," ASME, Journal of Appl Mech. Rev, Vol.49, No.10, Part.2, 1996, pp175-183.
- H. Xie, W. Lui, and K. Haley, "Thermal Solutions to PentiumR Processors in TCP in Notebooks and Sub-Notebooks," IEEE, Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, Vol.19, No.1, 1996, pp54-65.
- K. Take, Y. Furukawa, and S. Ushioda, "Fundamental Investigation of Roll Bond Heat Pipe," IEEE, InterSociety Conference on Thermal Phenomena, 1998, pp501-506.
- T. Kobayashi, T. Ogushi, N. Sumi, and M. Fujii, "Thermal Design of a Ultra-slim Notebook Computer," IEEE, InterSociety Conference on Thermal Phenomena, 1998, pp15-21.
- Y. Cao, M. Gao, and E. Pinilla, "Experiments and Analyses of Flat Miniature Heat Pipes," AIAA, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.11, No.2, 1997, pp158-164.

#### Study on High Power Density Flat Heat Pipe

Department of Mechanical Engineering,  
National Taiwan University,  
Taipei, Taiwan, ROC

#### Abstract

The performance of a heat pipe used in the cooling of CPU in a notebook computer is investigated in this study. In the analysis, it is shown that the capillary limitation plays a controlling roll in the maximum heat transport capacity of the heat pipe. Other limitations, like viscous, sonic, entrainment and boiling limitations are of minor importance. The effect of thickness of sintered wick structure has also been investigated. It is found that the maximum heat transport capacity increases with increasing thickness. However, the thermal resistance of the heat pipe increases also with increasing thickness of the sintered structure. Furthermore, experiments are carried out with heat pipes made in our own laboratory. Comparison is finally made between the experimental and theoretical results.

Keywords : electronic cooling、heat pipe

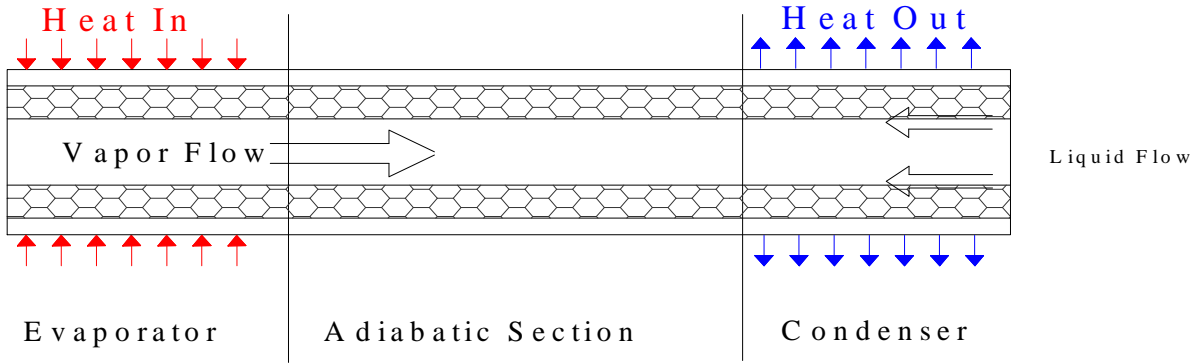


圖 ( 1 )

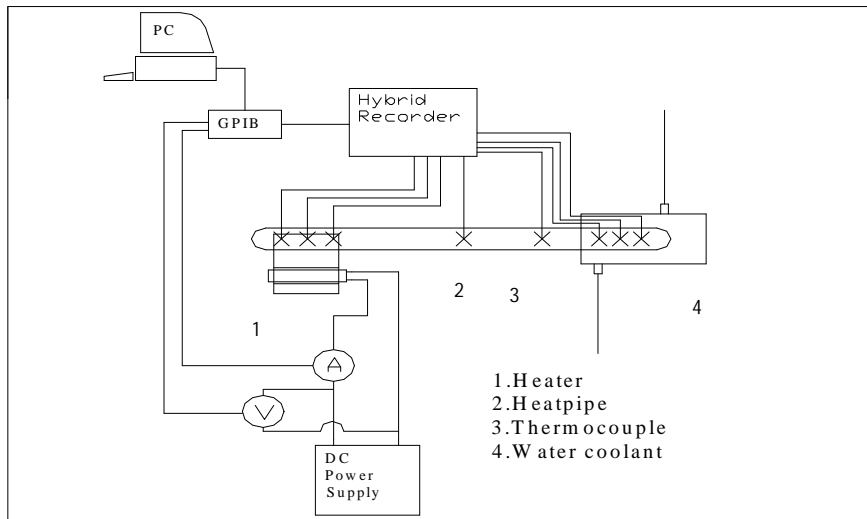


圖 ( 2 )

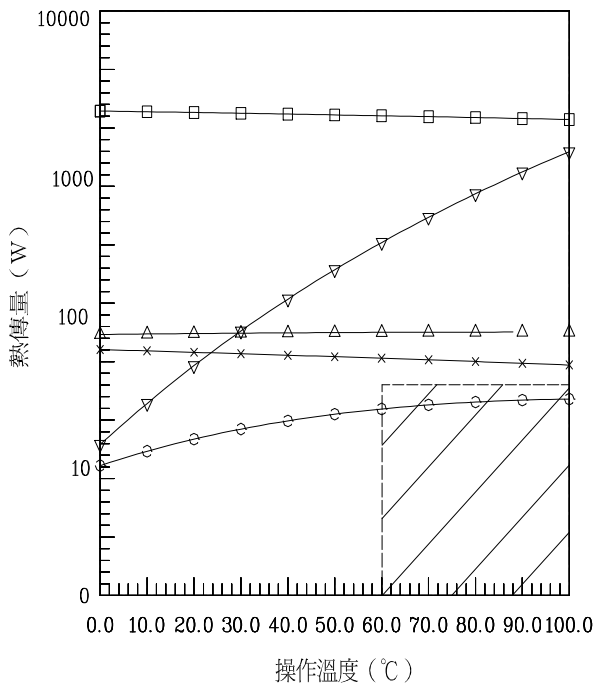
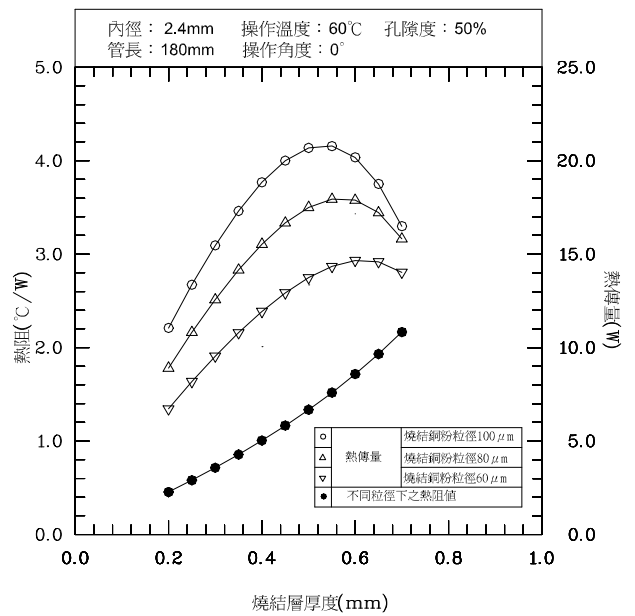


圖 ( 3 )



3mm熱管計算性能曲線圖

圖 ( 4 )

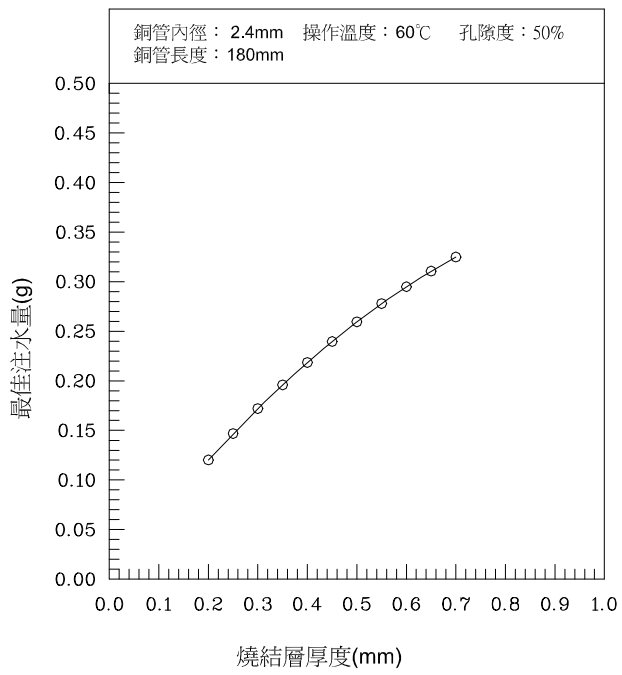


圖 (5)

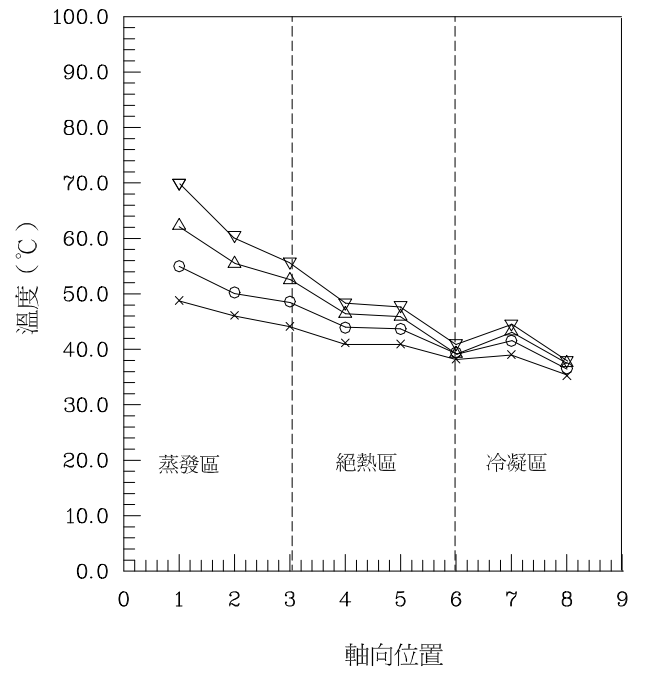


圖 (7)

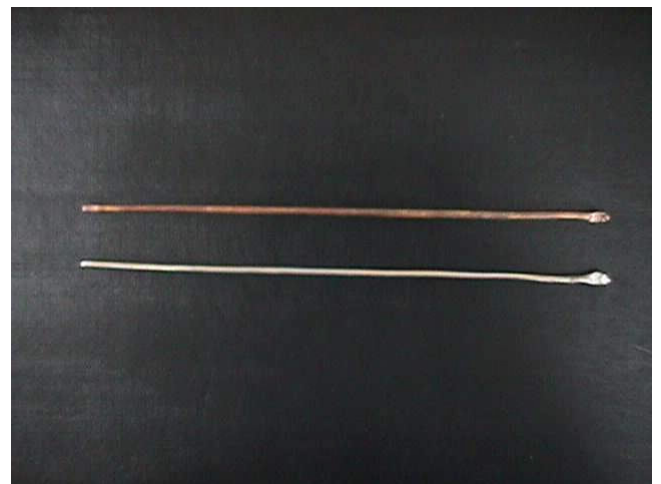
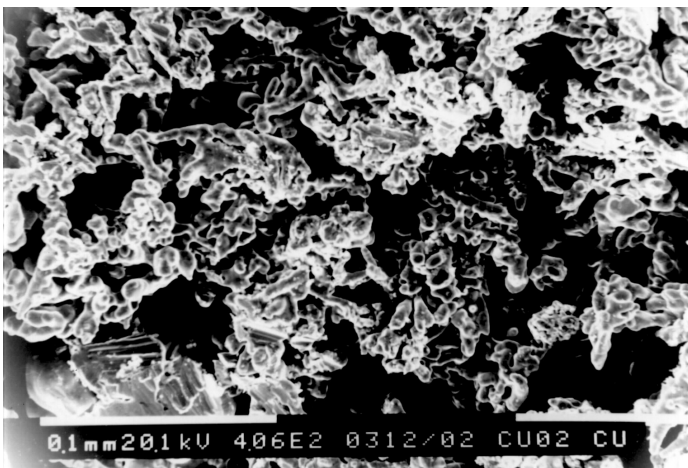


圖 (6)