

## 形狀記憶合金驅動之微形幫浦

### 摘要

鈦鎳形狀記憶合金(TiNi SMAs)由於具有優異的形狀記憶效應(SME)及超彈性(PE)，此種特性可應用於微機械(MEMS)中之微幫浦(Micropump)、致動器(Actuator)及流量控制(Flow Control)等元件中，因此需要製造可精密控制成分之鈦鎳合金(即可精確控制鈦鎳合金之變態溫度)，同時具有優良形狀記憶特性、缺陷少且易於再加工至所需尺寸及厚度且兩面皆光面之鈦鎳形狀記憶合金薄膜與鈦鎳形狀記憶合金箔來驅動無閥式擴散器幫浦。本年度計劃主要探討鈦鎳合金薄膜與合金箔之機械與材料特性。

### 一、前言

微形幫浦在機械、電機、光學、生物、化學、醫學等許多領域都有很廣泛的用途，隨著 MEMS 技術的提昇，微形幫浦也發展出許多不同的類型，各有不同的優缺點。現有微幫浦系統中，大致包括了兩個主要部分，其一是致動腔室(Actuating chamber)，為具有一個往復振動薄膜(Diaphragm)的腔室，驅動其中流體運動，其二為止回閥(Valve)，其功用在使用往復受力的流體止流向一方。這兩部分一般都是分別製作完成，再以黏合方式將之合為一體，做成微幫浦，費工耗時，良率及可靠度低。有閥式微幫浦是以止回閥，避免流體有回流的現象，而提高幫浦的效能，但止回閥的設計實用上也有許多的問題存在，如磨損、疲勞等。另一類微幫浦是利用無閥式擴散器取代主動、被動式止回閥，使用擴散器主要的優點是它沒有移動結構，可避免機械疲勞、破壞和阻塞。

就薄膜的選擇而言，形狀記憶合金薄膜化後，由於表面積與體積比大

增，對於其致動能力也大為提昇，且具有良好的加工性、熱循環穩定性、耐蝕性及延展性，並且因其單位體積所能提供的能量較其他致動材料來得大，並且擁有較長的致動距離，所以形狀記憶合金薄膜可說是深具潛力的微致動器候選材料 [1,2,3]。

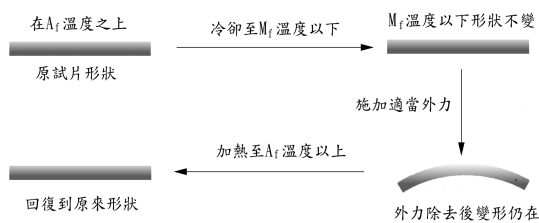
以往習用之技術主要是利用濺鍍沉積法(Sputter Deposition)製成[4,5]。濺鍍沉積法具有易控制薄膜合金成分和厚度的優點，但其製程緩慢，濺鍍薄膜纖構固定，且易受到雜質(如氧等)污染而影響薄膜在形狀記憶特性上的表現，此外，由於薄膜需沉積在一基材上，其後將薄膜由基材取下則是相當的困難。因此在此領域中極需一種方法，其係可製造出能精確控制鈦鎳合金成分、具優良形狀記憶特性、缺陷少、易於再加工至所需尺寸且兩面皆為光面之鈦鎳形狀記憶合金箔。本計劃因此除採用濺鍍沉積法製成形狀記憶合金薄膜，亦研究利用雙陰極平板電解研磨拋光的方法研發鈦鎳合金箔，此方法的優點為不需要使用濺鍍設備，可以低成本且快速方便的製造出各種大小及厚度之鈦鎳形狀記憶合金箔。鈦鎳合金箔的化學組成成分在提供合金塊材時便可精確的被控制，且在製程中不易受到雜質的污染；經由不同的加工及熱處理的方法，可以控制所需之結晶組織及變態溫度。而使用雙陰極平板可同時電解拋光薄板兩面，減少拋光時間，改善試片表面品質，並得到所需之兩面皆為光面的鈦鎳合金箔。

本計劃將以鈦鎳形狀記憶合金薄膜與鈦鎳形狀記憶合金箔來驅動無閥式擴散器幫浦。

## 二、形狀記憶效應

所謂形狀記憶效應是指在固體中一種結晶可逆的麻田散體相變態，也就是在麻田散體相施加一適度的外力，使形狀記憶合金產生適度的變形，然後再將外力移除，並提升溫度直至逆變態起始點  $A_s$ ，此時形狀記憶合金會逐漸回復到原來的形狀，直到溫度高於  $A_f$  後完全回復到原來的形狀，如圖一所示。而誘發麻田散體相變態的主要因素為溫度與壓力；前者形成的機構為溫度誘發麻田散體相變態，後者形成的機構為應力誘發麻田散體相變態，使形狀記憶合金具有超彈性效應。

我們可以將形狀記憶效應的簡要原理及發生過程由以下四個步驟來說明：(1)降低溫度，使溫度低於  $M_f$  以產生麻田散體相變態。(2)施加適度的外力，使其產生有限度之變形。(3)將外力移除，此時仍保留變形之狀態。(4)升溫至  $A_f$  以上，產生逆變態以回復材料原來之外形。



圖一形狀記憶合金  $M_s$ 、 $M_f$ 、 $A_s$ 、 $A_f$  的定義及形狀記憶效應示意圖

第一階段的降溫過程中，母相依熱力學的平衡進行熱彈性麻田散體相變態，並形成自我調適 (Self-accommodation) 的麻田散體。也就是說母相在生成單一麻田散體時，會因為單方向的剪切而產生相當大的

變形，為了降低此形狀的應變，在降溫的變態過程中，麻田散體會以自我調適的方式成長。在第二階段中，麻田體因外力的施加產生有相當大的變形，此變形與一般金屬變形的機構不同，一般金屬的變形機構是滑移 (Slip)，而形狀記憶合金則為麻田散體中各個兄弟晶間合併的調適機構。第三階段將外力移除後，麻田散體因其本身自我調適而呈現暫穩態狀態，當外力移除後不再施以任何能量(如升溫行為)，也就是說合金將維持於施力後產生形變的形狀。第四階段中，逐步提升溫度直至  $A_s$ ，此時麻田散體開始產生逆變態，且由於兄弟晶的麻田散體與母相晶格間有一定的對應關係，因此麻田散體會沿著原來剪切的逆方向逐漸回復至母相；當溫度高於  $A_f$  時，此時晶格間的逆變態完全完成，在巨觀上會回復到原來的形狀。

## 三、結果與討論---擴散式幫浦

擴散器正負方向的壓力降，可以以下型式表示

$$\Delta p_{positive} = \frac{\rho v_{positive}^2}{2} \xi_{positive} \quad (3-1)$$

$$\Delta p_{negative} = \frac{\rho v_{negative}^2}{2} \xi_{negative} \quad (3-2)$$

其中  $v_{positive}$  和  $v_{negative}$  為擴散器正負方向最窄區域的平均速度，則擴散器正負方向的體積流率如下

$$\phi_{positive} = A_{positive} \times v_{positive} \quad (3-3)$$

$$\phi_{negative} = A_{negative} \times v_{negative} \quad (3-4)$$

其中  $A_{positive}$  與  $A_{negative}$  為擴散器正負方

向最窄的面積，如果尺寸大小一樣，則  $A_{positive} = A_{negative} = A$ ，則(3-3)(3-4)可改寫為

$$\phi_{positive} = A \times v_{positive} \quad (3-5)$$

$$\phi_{negative} = A \times v_{negative} \quad (3-6)$$

由(3-1)(3-2)式中可得知擴散器正負方向載口速度分別為

$$v_{positive} = \left( 2\Delta p_{positive} / \rho \xi_{positive} \right)^{1/2} \quad (3-7)$$

$$v_{negative} = \left( 2\Delta p_{negative} / \rho \xi_{negative} \right)^{1/2} \quad (3-8)$$

將(3-7)(3-8)代入(3-5)(3-6)中，則擴散器正負方向的體積流率可改寫為

$$\phi_{positive} = A \left( 2\Delta p_{positive} / \rho \xi_{positive} \right)^{1/2} \quad (3-9)$$

$$\phi_{negative} = A \left( 2\Delta p_{negative} / \rho \xi_{negative} \right)^{1/2} \quad (3-10)$$

計算過程中假設擴散器完全相同，且入口、出口的壓力相對於貯存器的壓力可忽略。假設體積變化可以以弦波的方式描述，則體積變化可寫為

$$V_o = V_x \sin(2\pi ft) \quad (3-11)$$

其中  $V_x$  為體積變化的振幅， $f$  為幫浦的驅動頻率。假設壓力損失係數在整個幫浦作動的過程中不會改變，則薄膜來回振動一次，從出口傳送出的流體體積為

$$V_o = 2V_x \left[ \frac{(\eta)^{1/2} - 1}{(\eta)^{1/2} + 1} \right] \quad (3-12)$$

若使用相同薄膜大小之停止閥幫浦，假設停止閥關閉時，回流量等於零，則薄膜來回振動一次，則最大傳輸體積為  $2V_x$ 。所以定義擴散式幫浦之幫浦行程效率 (pump stroke efficiency)

為

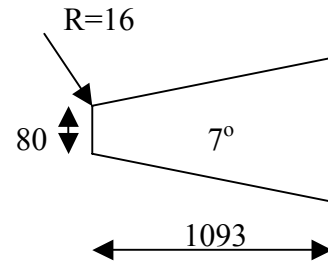
$$\eta_p = \frac{V_o}{2V_x} = \frac{(\eta)^{1/2} - 1}{(\eta)^{1/2} + 1} \quad (3-13)$$

由本式可得知， $\eta = \xi_{negative} / \xi_{positive}$  必須大於 1，幫浦才會作動，而且越大效率越高。

#### 四、形狀記憶合金擴散式幫浦設計

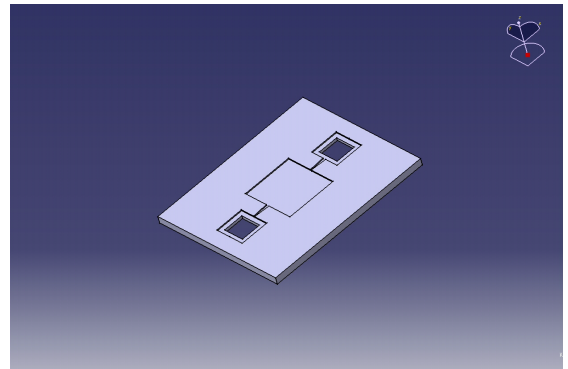
##### a. 流道設計

如圖二所示，擴散器入口導角半徑為  $16\mu m$ ，窄口寬度為  $80\mu m$ ，長度  $L$  為  $1093\mu m$ ，開口角度為  $7^\circ$



圖二 擴散器尺寸(單位  $\mu m$ )

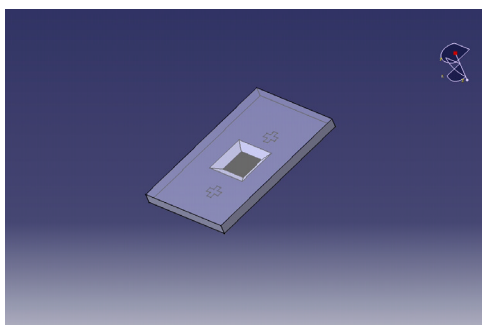
流道設計為兩個擴散器的組合，如圖三所示。



圖三 流道立體圖

##### b. 驅動器設計

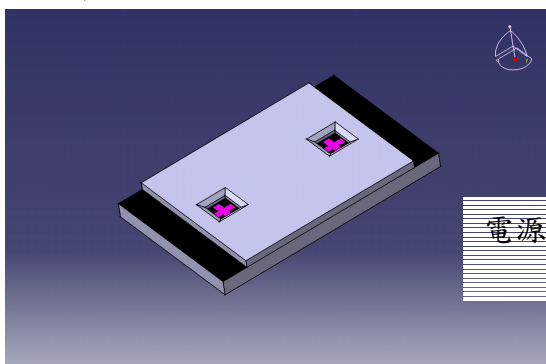
將 TiNi 薄膜底下的 silicon 蝕刻掉，再與玻璃在真空中 bonding，如圖四所示。



圖四 silicon 與玻璃在真空下 bonding

#### c. 幫浦設計

將流道與 TiNi 驅動器 bonding 成完整的幫浦，如圖五所示。



圖五 幫浦組合圖

### 四、結果與討論—鈦鎳合金箔

為了製造  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$  原子比例之鈦鎳形狀記憶合金，秤取所需原子比例的純鈦 (99.7 wt %) 及純鎳 (99.9 wt %)，經由真空電弧熔煉，熔煉時通入氬氣為保護氣體，並使用純鈦粒為吸氧劑 (Getter)，重複熔煉六次，以俾合金均質化。將熔煉後之鑄錠置於高溫爐  $800^\circ\text{C}$  反覆熱軋至厚度為 1 mm 以下之鈦鎳合金板。用兩片 0.5 mm 厚之不銹鋼板上下將該鈦鎳合金板夾住，並於疊板四邊行多點鉚接，確實將鈦鎳合金板及上下之不銹鋼板以鉚點鉚住，繼續將此疊板於  $800^\circ\text{C}$  行熱軋，將合金板以軋輪軋至厚度約 0.1 mm。重

覆上述軋延方式可以得到更薄之鈦鎳合金箔。

如圖 6 所示，使用兩部電源供應器及兩塊銅板於鈦鎳合金薄板兩面行雙陰極平板電解研磨拋光，電解液為  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (99.8%) :  $\text{HClO}_4$  (70%) = 100 : 5 之混合溶液，電解電壓約為 20V，電解電流約為 1A，電解溫度為  $24^\circ\text{C}$ 。電解液溫度以溫度計量測，並以恆溫水槽控制電解液溫度。電解過程不攪拌，即可以得到表面光亮之鈦鎳合金箔，電解研磨拋光約 20 分鐘，即可得到厚度  $10\mu\text{m}$  以下之箔片。

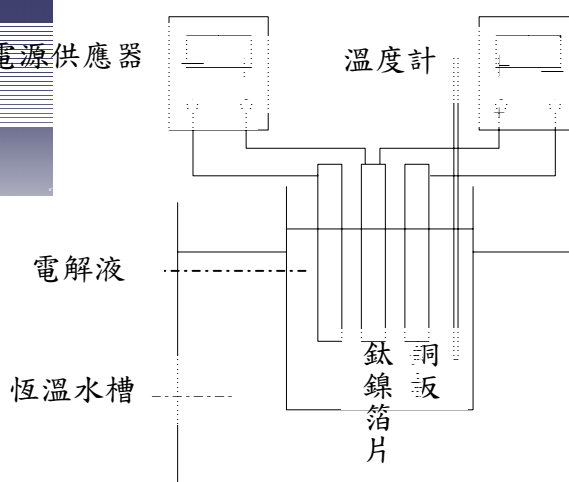


圖 6 電解拋光示意圖

圖 7 為鈦鎳合金箔側邊的 SEM 照片，由圖顯示厚度大約為  $6\mu\text{m}$ 。

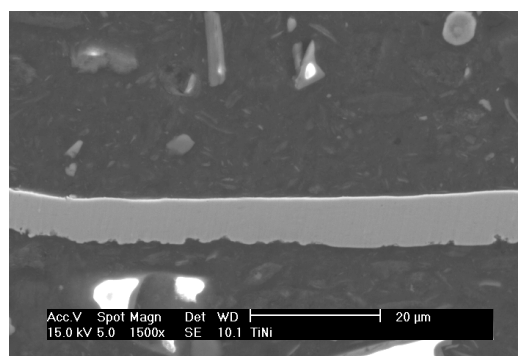


圖 7 鈦鎳合金箔片藉由 SEM 照片顯示厚度之圖

而圖 8 為鈦鎳形狀記憶合金箔之電解時間和厚度的關係圖，起始厚度約為  $100\ \mu\text{m}$  之鈦鎳合金箔片，雙陰極以各為 20V 的電壓同時對鈦鎳箔兩面進行電解拋光研磨約 12 分鐘時，鈦鎳箔厚度可達約  $20\ \mu\text{m}$ 。

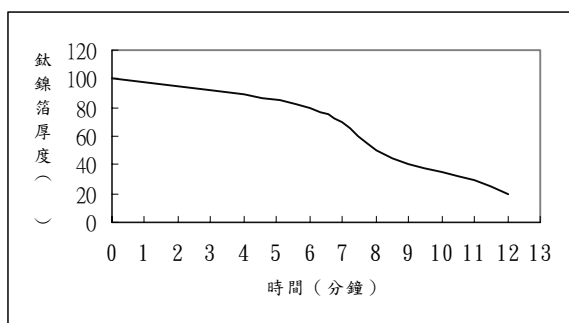


圖 8 鈦鎳合金箔片電解拋光之時間和厚度的關係圖

最後圖 9 為將電解研磨拋光完成之鈦鎳合金箔片行微差掃描熱分析 (DSC) 實驗之結果，可以得到吸、放熱峰，且變態溫度和鈦鎳合金塊材之結果相似。麻田散體變態開始溫度 ( $M_s$ ) 及結束溫度 ( $M_f$ ) 分別為  $32.74^\circ\text{C}$  及  $8.78^\circ\text{C}$ ；母相變態開始溫度 ( $A_s$ ) 及結束溫度 ( $A_f$ ) 分別為  $51.78^\circ\text{C}$  及  $71.67^\circ\text{C}$ ，吸、放熱皆約為  $13\text{J/g}$ ，顯示該合金箔片具有良好的形狀記憶特性。

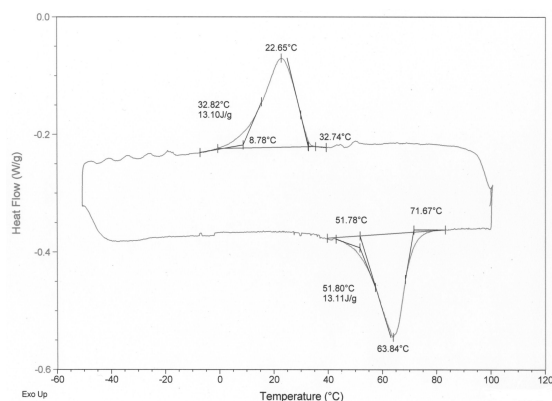


圖 9 鈦鎳合金箔片之差微掃描熱分析(DSC)之圖

## 五、參考文獻

- [1] E. Makino, M. Uenoyama and T. Shibata Katsutoshi, Flash Evaporation of TiNi Shape Memory Thin Film for Microactuators, *Sensors and Actuators A*, Vol. 71, pp. 187-192, 1998.
- [2] E. Makino and T. Mitsuya and T. Shibata, Dynamic Actuation Properties of TiNi Shape Memory Diaphragm, *Sensors and Actuators A*, Vol. 79, pp. 128-135, 2000.
- [3] E. Makino and T. Shibata and K. Kato, Fabrication of TiNi Shape Memory Micropump, *Sensors and Actuators A*, Vol. 88, pp. 256-262, 2001.
- [4] Katsutoshi, Y. Masaaki Proceeding - IEEE Micro Electro Mechanical System(1990) 217-221.
- [5] Tomus D, Tsuchiya K, Inuzuka M, Sasaki M, Imai D, Ohmori T, Umemoto M, Scripta Materialia 2003 (48) 489-494.