

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

微奈米磨耗對金屬薄膜材料奈米磨潤性能影響之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-168-036-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：崑山科技大學機械工程系

計畫主持人：劉玉熙
共同主持人：于劍平
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：陳毅謙、黃瑞鴻、黃韋強

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月25日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

微奈米磨耗對金屬薄膜材料奈米磨潤性能影響之研究
Study on the effect of measurement conditions with nano/micro wear on the thin metal films of nanotribological performance

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-168 -036 -

執行期間：95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

計畫主持人：劉玉熙

共同主持人：于劍平

計畫參與人員：陳毅謙、黃韋強、黃瑞鴻

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：崑山科技大學

中 華 民 國 96 年 10 月 25 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

奈米磨潤下不同金屬薄膜材料性質微磨耗機制之研究

Study on the effect of measurement conditions with nano/micro wear on the thin metal films of nanotribological performance

計畫編號：NSC 95-2221-E-168-036

執行期限：95年8月1日至96年7月31日

主持人：劉玉熙 崑山科技大學機械工程系(所)

共同主持人：于劍平 崑山科技大學機械工程系(所)

計畫參與人員：陳毅謙、黃韋強、黃瑞鴻

崑山科技大學機械工程系(所)

一、中文摘要

近因微奈米技術的快速發展，致使許多薄膜及微結構材料運用極廣，再加上相關的研究均需要其材料性質來作分析，故微奈米下的材料性質就日益重要，如：材料奈米磨耗性質等。但一般於傳統巨觀尺度下所量測出之材料性質大部分均無法直接運用至微奈米下的領域，且巨觀與奈米下之性質差異甚大，因此必須重新設計實驗量測方式，而本研究所用之奈米薄膜性質測試儀(NanoTest)即可量測材料之奈米磨耗性質。再著，一般影響材料之奈米磨耗性質的因素很多，故本研究主要針對奈米磨耗量測時之相關製程參數與試件表面產生之磨耗，其相互間之關係來進行研究探討。本研究首先利用田口式實驗法，配合奈米薄膜性質量測儀的量測技術，以Pin-On-Disc(POD)的方式來進行奈米磨耗性質實驗，針對工件材料、施加負荷(Applied load)、轉速(Revolved speed)及旋轉中心距離四個製程參數對奈米磨耗性質試驗時所產生之摩擦係數及磨耗量做 L9

直交表與變異數分析之研究。實驗結果顯示：影響摩擦係數的因素主要為工件材料，次要為旋轉中心距離；而影響磨耗量的因素主要為工件材料，次要為旋轉中心距離。

關鍵詞：奈米磨耗，奈米薄膜性質測試儀，Pin-On-Disc，田口實驗法，變異數分析。

Abstract

The nanotechnologies develop rapidly recently. Many thin films and microstructure are applied very widely. And many investigations need the nano-properties of materials to analyze. The material properties in nanometer are more important, ie. The nanotribological properties. But most of the measured material properties in macroscale could not be used directly to the domain of micro/nano-meter. We must design the experiment again. The NanoTest was employed to measure the material properties of nanotribology in this investigation. Furthermore, the factors that affect the material properties of nanotribolgy are also discussed. First Taguchi method is employed

in this study. With the NanoTest, the Pin-On-Disc is used to measure the properties of nanotribology. The L9 orthogonal array with four factors is selected. The four factors are specimen material, applied load, revolved speed, and revolved radius. Analyzed results show that the main influencing factors for coefficient of friction are specimen material and revolved radius. The main influencing factors for abrasion are also the specimen material and revolved radius. Estimations and confirmation experiments were performed, verifying the Taguchi predictions.

Keywords: Nanotribology, Pin-On-Disc (POD), NanoTest, Taguchi method, ANOVA.

二、緣由目的與相關文獻回顧

在近代薄膜製程技術開始受到重視，而奈米技術更快速發展，一般傳統式量測並不適用於薄膜與奈米結構之元件，因此必須使用新的設計量測方式，以得到所需要之材料性質。薄膜 IC 製程技術製作之微機電元件，經常會利用到微奈米厚度的薄膜元件，因此即使是僅有數奈米的磨耗量，對元件的壽命也會有相當大的影響，因此如何評估微機電元件磨耗的相關特性，包括微元件的硬度、表面粗度、元件與元件間的結合力、磨擦力及元件運轉後的磨耗量等，唯有透過這些微物理量的定量量測，才能對微機電系統的磨耗機制有正確的認識，也才能精確預估微機電系統的使用壽命及開發耐久的微機電元件。

在一般的機械加工中，摩擦現象是常常發生，進而產生熱能並且在物體間產生磨耗，而磨耗會因為改變外在的因素而不同也有所變化。摩擦是兩相對運動物體之接觸面發生之阻力，磨耗則是物體因兩面間的相對運動造成材料漸漸流失。一般從材料表面移去材料有兩種方法，其一是藉由化學反應的方法使材料去除；其二是從表面破裂而去除，也就是機械力作用產生的磨耗。而摩擦力與摩擦係數的量測，最典型的是銷對盤（Pin-On-Disc, POD）實驗，利用銷上之測試探頭與轉盤間產生的摩擦，在探頭部份截取與探頭施力方向垂直的能量，進而計算出摩擦力、摩擦係數與磨耗量[1]。

現今奈米技術是新科技主流，它涵蓋了許多領域且快速發展，奈米尺度下的摩擦現象是其中一個主要的關鍵，而且由奈米的角度探討摩擦現象也提供了微觀現象特性的橋樑。一般於傳統巨觀尺度下所量測出之材料性質大部分均無法直接運用至微奈米下的領域，且巨觀與奈米下之性質差異甚大[2-4]，因此必須重新設計實驗量測方式，而本研究所用之奈米薄膜性質測試儀（NanoTest）即可量測材料之奈米磨耗性質。再著，一般影響材料之奈米磨耗性質的因素很多，故本研究主要針對奈米磨耗量測時之相關製程參數與試件表面產生之磨耗，其相互間之關係來進行研究探討。

而目前奈米技術必須將摩擦範圍減

少，可使得取得數值準確率提高，並減少誤差量的影響。美國前總統柯林頓推動「國家奈米技術策略(NNI)」，使得「奈米技術」繼「資訊技術(IT)」與「生物技術」之後，成為美國積極發展之三大未來革命技術之一，其中美國國家標準與技術局(NIST)已有在規劃研究奈米摩擦學[5]。在 L.J. Yang 於 POD 測試中移動的 Pin 在 3 個不同 DISC 下的研究[6]，雷射與分光鏡亦可量測磨耗的狀況[7]，在熱環境的下摩擦與磨耗亦有不同[8]，在試件為鍍膜亦可量測磨耗的狀況[9]。

本研究首先利用田口式實驗法，配合奈米薄膜性質量測儀的量測技術，以POD的方式來進行奈米磨耗性質實驗，針對工件材料、施加負荷(Applied load)、轉速(Revolved speed)及旋轉中心距離四個製程參數對奈米磨耗性質試驗時所產生之摩擦係數及磨耗量做L9直交表與變異數分析之研究。

三、實驗方法及步驟

3.1 實驗規劃與流程

本實驗之流程，如圖 1 所示。首先將實驗之試件材料備製完成，接者決定所欲分析之製程參數及其水準，配置合適之直交表，再設定奈米薄膜性質測試儀之操作參數，即可開始作摩擦係數與磨耗量之田口分析實驗，接者計算 S/N 比，繪出各水準之回應圖，最後作變異數分析。

本研究使用奈米磨耗實驗是用

Pin-On-Disc (POD) 的方式，圖 2 為 POD 之示意圖，銷(Pin)上有探針使用儀器為奈米薄膜性質測試儀，其為英國 Micro Materials Ltd 製造之機型，可作奈米硬度 (Nano-indentation)、奈米刮痕 (Nano-scratching)、奈米衝擊 (Nano-impact)、奈米磨耗 (Nano-tribology) 等之實驗，圖 3 為奈米薄膜性質測試儀之量測機構圖。而其操作步驟如圖 4 所示。實驗之製程參數設定值，如表 1 所示。

3.2 田口式實驗方法與製程參數配置

當實驗影響的因素甚多，且其影響性又未知時，為避免逐一加以探討，消耗過多之財力及時間的浪費，故採用田口式實驗方法 (Taguchi Method)，來輔助實驗參數的設定，且透過田口式實驗分析過程，確定影響實驗結果之因素，並分析各參數對實驗結果的影響性，使後續的實驗有關係性可依循。

本實驗的目的，在於釐清影響奈米磨耗時摩擦係數及磨耗量之相關製程參數，建立二者間的關係性；故本實驗只針對影響二者之製程參數加以探討。據相關的研究 [2-4]，指出影響參數有：施加負荷、轉速、旋轉中心距離等項目，故僅將此項目加上工件材料之製程參數設定不同的水準，而其餘製程參數在實驗過程中皆設定相同，不予變動。

因本實驗有四個實驗參數，而分別設定三個水準，故選擇使用 L9 直交表 [11]，其

各因素及水準配置如表 2 所示，將各實驗參數之水準代入直交表的水準設置中，即可得各組製程參數設定，如表 3 所示。其中對水準設置作一說明，因素 A 是工件材料，選擇水準為鋁材、矽及石英，鋁材為金屬延展性佳，同時導電及導熱性均佳；矽為半導體材料，本身接近硬脆性材料；石英為非金屬材料，屬硬脆性材料，同時導電及導熱性均不佳，因三者差異性大故選用此三材料為其水準。因素 B 是施加負荷是奈米磨耗性質試驗時必須施加在銷(Pin)之正向力，此力之大小均在數十毫牛頓 (mN) 間，因此設定 10 mN、20 mN 及 30 mN 作為其水準。因素 C 為轉速是指轉盤 (Disc) 的轉速，作為 POD 實驗時相對運動之來源，因此設定 10 rev/min、20 rev/min 及 30 rev/min 作為其水準。最後，因素 D 是旋轉中心距離為銷(Pin)距轉盤 (Disc) 旋轉中心之距離，如圖 5 所示，設定 1000 μ m、3000 μ m 及 5000 μ m 作為其水準。

四、結果與討論

經過實驗後將其試件利用光學顯微鏡觀察其表面可看到 POD 所造成之圓形刮痕，如圖 6 所示。再將試件刮痕之部分作掃描式電子顯微鏡觀察，可看到 POD 實驗對金屬鋁材 (No.1~No.3) 造成之刮痕較其他試件材料要深要寬，如圖 7 所示。同時本研究是利用田口實驗計劃法來進行分析，其是將品質特性(Quality characteristic)轉換為信號雜音，再利用信號雜音比 (S/N

比，signal to noise) 之特性，找到變異小而品質佳的設計。同時，S/N 比具有增加因子效果之加乘性，減少交互作用影響之優點，可同時處理平均值及變異，以提高實驗品質，即 S/N 比愈高表示品質愈穩定，系統的機能愈趨於理想的目標。本實驗分析之特性有摩擦係數及磨耗量，其目標最佳特性質為零，因此均為望小特性 (The-Smaller- The-Better)，故計算 S/N 比必須用公式(1)來計算[11]， y_i 表示實驗第 i 次的數據， n 表示實驗次數。

$$\eta = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (1)$$

摩擦係數之田口分析

根據表 3 之直交表的配置設定奈米磨耗實驗之製程參數，利用 POD 的方式進行磨耗實驗，量取摩擦計算出摩擦係數，得到結果如表 4 所示。再依序計算出各組實驗條件的 S/N 比，結果列於表 4 的最右一欄。再根據表 3 的配置，求得各個因素在不同水準下的 S/N 比強度，如表 5 所示。依據表 5 之數據，繪製各因素之回應圖，如圖 8 所示，由圖中可較清楚的觀察到各個因素影響摩擦係數的趨勢。選取各因素 S/N 比較高的水準組合即得：A2B2C3D1，表示工件材料為 Si，施加負荷為 20mN，轉速為 30rev/min 及旋轉中心距離為 1000 μ m，此組合亦代表摩擦係數最小之最佳製程參數組合。

接著根據表 4 之 S/N 比計算結果，經過變異數的計算分析，可找出各因素測定值與

目標值的偏差量，即各因素的變動情形，分析其變動性，可得到各因素對摩擦係數的影響程度，藉此分析以掌握各因素的貢獻率及作為日後調整因素的方向。接者計算各因素之變異數分析，表 6 即為各因素的變異數分析表，包括自由度、變動、變異及貢獻率之計算結果。在表 6 中，可發現對摩擦力，工件材料的影響程度最大，其貢獻率達到了 55.43%，而旋轉中心距離的影響性次之，其貢獻率達到 25.49%，而施加負荷及轉速影響較小。由此結果得之：工件材料的改變會對摩擦係數造成很大的影響，因各種之材料特性不同，而在作奈米磨耗實驗時，銷上之探頭是在表面上作刮痕(Scratching)的動作，因此材料表面的特性就顯的很重要。

磨耗量之田口分析

根據表 3 之直交表的配置設定奈米磨耗實驗之製程參數，利用 POD 的方式進行磨耗實驗，利用工具顯微鏡量取刮痕尺寸計算出磨耗量，得到結果如表 7 所示。再依序計算出各組實驗條件的 S/N 比，結果列於表 7 的最右一欄。再根據表 3 的配置，求得各個因素在不同水準下的 S/N 比強度，如表 8 所示。依據表 8 之數據，繪製各因素之回應圖，如圖 9 所示，由圖中可較清楚的觀察到各個因素影響磨耗量的趨勢。選取各因素 S/N 比較高的水準組合即得：A3B1C2D1，表示工件材料為石英，施加負荷為 10mN，轉速為 20rev/min 及旋轉中心距離為 1000 μm ，此組合亦代表磨耗

量最小之最佳製程參數組合。

根據表 7 之 S/N 比計算結果，經過變異數的計算分析，可找出各因素測定值與目標值的偏差量，即各因素的變動情形，分析其變動性，可得到各因素對摩擦係數的影響程度，藉此分析以掌握各因素的貢獻率及作為日後調整因素的方向。接者計算各因素之變異數分析，表 9 即為各因素的變異數分析表，包括自由度、變動、變異及貢獻率之計算結果。在表 9 中，可發現對摩擦力，工件材料的影響程度最大，其貢獻率達到了 51.69%，而旋轉中心距離的影響性次之，其貢獻率達到 32.97%，而施加負荷及轉速影響較小。

五、結論及成果自評

根據本實驗研究結果，選定之參數

配置下歸納出下列之結論：

1. 摩擦係數最小之最佳製程參數組合：工件材料為 Si，施加負荷為 20mN，轉速為 30rev/min 及旋轉中心距離為 1000 μm 。
2. 磨耗量最小之最佳製程參數組合：工件材料為石英，施加負荷為 10mN，轉速為 20rev/min 及旋轉中心距離為 1000 μm 。
3. 利用田口式實驗法，找出影響奈米磨耗之摩擦係數之製程參數，所得結果為：影響摩擦係數之主要參數為工件材料，其次是旋轉中心距離。
4. 利用田口式實驗法，找出影響奈米磨耗之磨耗量之製程參數，所得結果為：影

響磨耗量之主要參數為工件材料，其次是旋轉中心距離。

另外，在整體成果方面本研究均已達成計畫所訂目標，並於國內研討會發表十三篇相關奈米及微磨潤之文章。本計畫且培養一位研究生及多位大學部專題生撰寫完成多篇研討會論文，使他們未來可順利投入高科技領域，成為國家社會所需之高科技人才。

六、參考文獻

[1] 陳士，”磨耗試驗--材料基礎實驗（二）

--磨耗試驗拉伸試驗。

[2] 賴泳次，”考慮不同材料性質與交互作用力之奈米滑動磨潤性質的分子靜力學探討”，國立中正大學機械系碩士論文，嘉義（2003）。

[3] 楊雲凱，”低溫離子束沈積含氮類鑽碳薄膜之附著功理論建立及微-奈米磨潤性能之研究”，國立成功大學機械工程學系碩士論文，台南，（2001）。

[4] B. Bhushan, Handbook of Micro/Nano Tribology, CRC Press, Boca Raton, FL, (1999).

[5] 工業技術研究院，“奈米技術簡介”，www.epa.gov.tw/cooperation/奈米技術/nanointro.htm。

[6] L.J. Yang ,”Pin-on-disc wear testing of tungsten carbide with a new moving pin technique”, Wear, 225-229,P. 557-562 (1999)。

[7] D.M. Elliott, R.T. Harding, J. Fisher, G.

Beamson, ”A tri-pin-on-disk apparatus for in situ X-ray photoelectron spectroscopy of worn surfaces”, Wear, 236, p.308-314,(1999)。

[8] C. Vergne , C. Boher , C. Levailant , R. Gras, ”Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool scale: application to the hot rolling process”, Wear, 250, p. 322-333, (2001)。

[9] F.H. Stott., M.P. Jordan, “The effects of load and substrate hardness on the development and maintenance of wear-protective layers during sliding at elevated temperatures”, Wear, 250, p. 391-400, (2001)。

[10] NanoTest operation manual, Micro Materials Ltd., (2003).

[11] 于劍平，蘇佳宏，呂建泉，製程參數對不同材料之奈米磨耗影響研究，磨潤暨材料科技研討會，雲林，台灣，第 142-148 頁，2004。

[12] 于劍平，簡依玲，張育斌，陳毅謙，”金屬鋁材表面微磨耗性質與行為之研究”，中國機械工程學會第 22 屆全國學術研討會，2005.11.26-27，國立中央大學。

[13] 于劍平，張育斌，簡依玲，陳毅謙，”鋁材表面微奈米磨耗性質量測之研究”，論文光碟編號：94008，第二屆磨潤暨材料科技研討會，崑山科技大學，台灣台南，2005/09/30。（Proceedings of 2005 Conference on the Tribology and Materials Technology,

- Kun Shan University, Taiwan, 2005/09/30.) (計畫編號：NSC93-2212-E-168-012)
- [14] 于劍平，江志偉，簡依玲，洪國榮，陳毅謙，朱梓明，”微孔放電加工製程參數對SKD11材料微孔表面特性影響之研究”，論文光碟編號：94010，第二屆磨潤暨材料科技研討會，崑山科技大學，台灣台南，2005/09/30。(Proceedings of 2005 Conference on the Tribology and Materials Technology, Kun Shan University, Taiwan, 2005/09/30.)
- [15] 于劍平，簡依玲，陳毅謙，魏豪彥，蘇佳宏，”不同材料性質於微奈米磨耗下表面行為之研究”，論文光碟編號：94056，第二屆磨潤暨材料科技研討會，崑山科技大學，台灣台南，2005/09/30。(Proceedings of 2005 Conference on the Tribology and Materials Technology, Kun Shan University, Taiwan, 2005/09/30.) (計畫編號：NSC93-2212-E-168-012)
- [16] 于劍平(2004)，”不同材料奈米磨潤性質量測之研究”，中國機械工程學會第21屆全國學術研討會，2004.11.26-27，國立中山大學。
- [17] 于劍平(2004)，”熱漂移效應對奈米壓痕硬度量測影響之研究”，中國機械工程學會第21屆全國學術研討會，2004.11.26-27，國立中山大學。
- [18] 鍾震桂，于劍平(2004)，”碳矽奈米複合薄膜製程與特性”，中國機械工程學會第21屆全國學術研討會，2004.11.26-27，國立中山大學。
- [19] 張育斌，于劍平(2004)，”碳鋼材料在乾嚴重磨耗過程中之摩擦帶電機制—第一集：碳鋼對鐵”，中國機械工程學會第21屆全國學術研討會，2004.11.26-27，國立中山大學。
- [20] 張育斌，于劍平(2004)，”碳鋼材料在乾嚴重磨耗過程中之摩擦帶電機制—第二集：鐵對碳鋼”，中國機械工程學會第21屆全國學術研討會，2004.11.26-27，國立中山大學。
- [21] 于劍平 (2004)，”製程參數對奈米磨耗影響之研究”，第一屆磨潤暨材料科技研討會，2004.04.20，雲林國立虎尾科技大學。
- [22] 張育斌，于劍平(2004)，”動態摩擦帶電機制應用於流量感測之研究”，第一屆磨潤暨材料科技研討會，2004.04.20，雲林國立虎尾科技大學。
- [23] 于劍平 (2003)，”不同製程參數對奈米磨耗影響之研究”，第二十屆機械工程全國學術研討會，新興工程技術—奈米工程技術，光碟論文編號：E02-24.

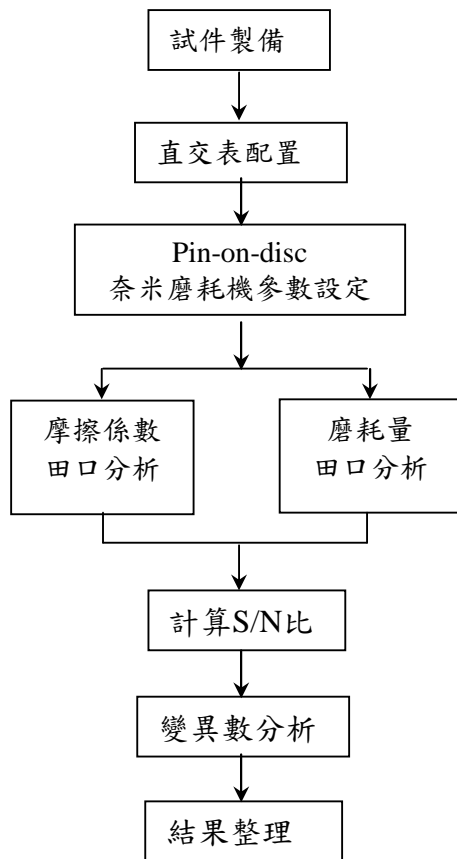


圖 1 實驗流程圖

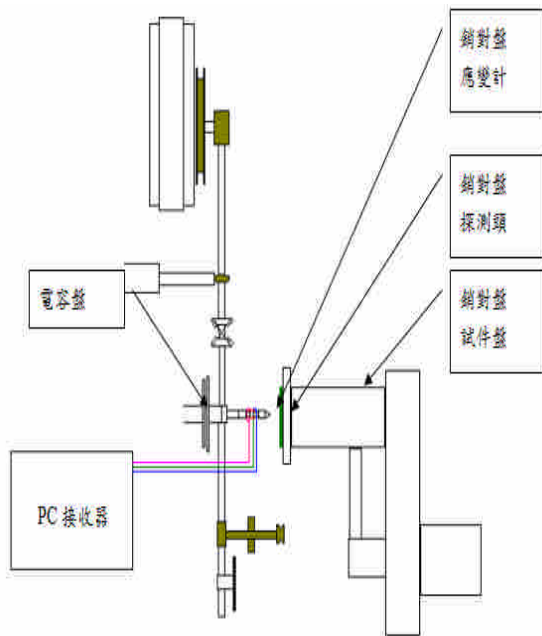


圖 2 Pin-on-Disc 奈米磨耗實驗裝置示意圖

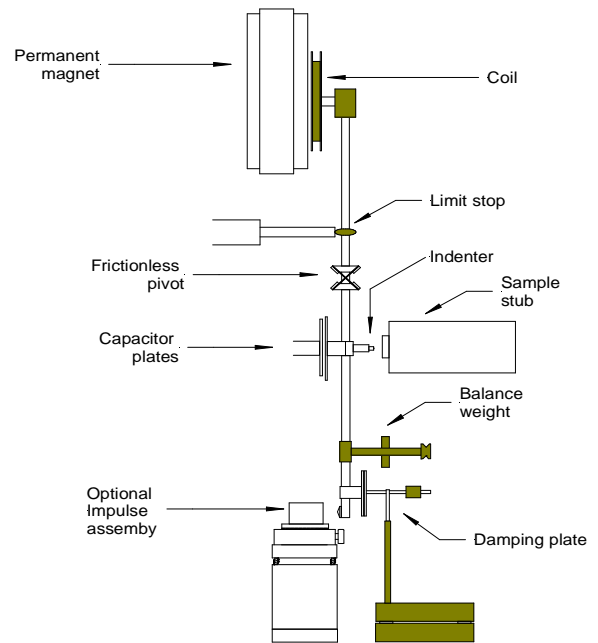


圖 3 奈米薄膜性質測試儀量測機構圖[10]

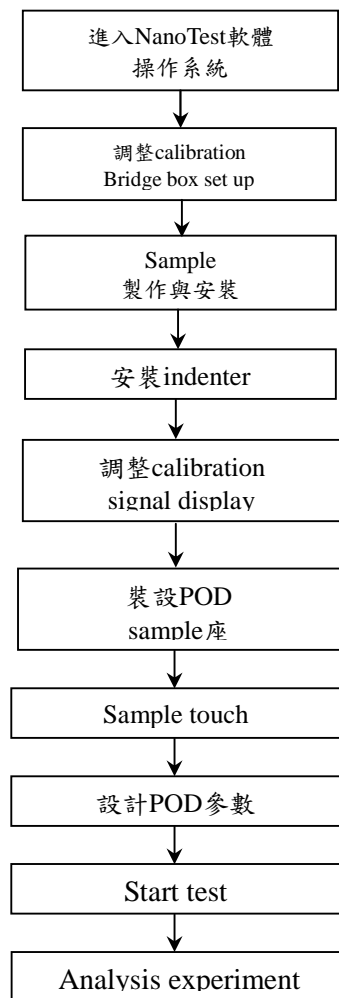


圖 4 奈米薄膜性質測試儀 POD 操作步驟

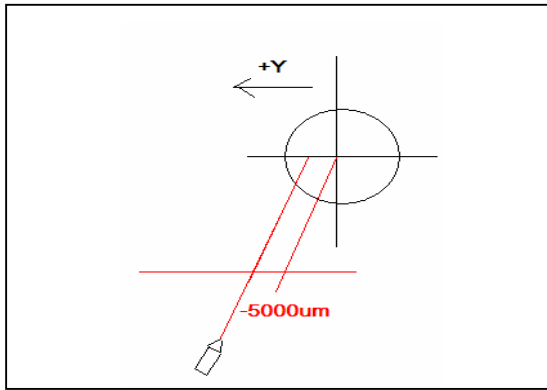


圖 5 旋轉中心距離示意圖(距離 5000 μm)

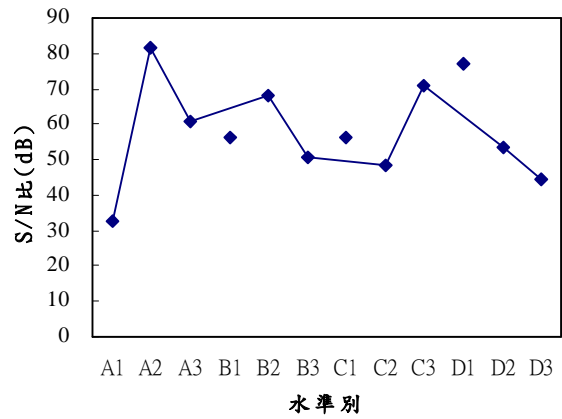


圖 8 各因素對摩擦係數的回應圖

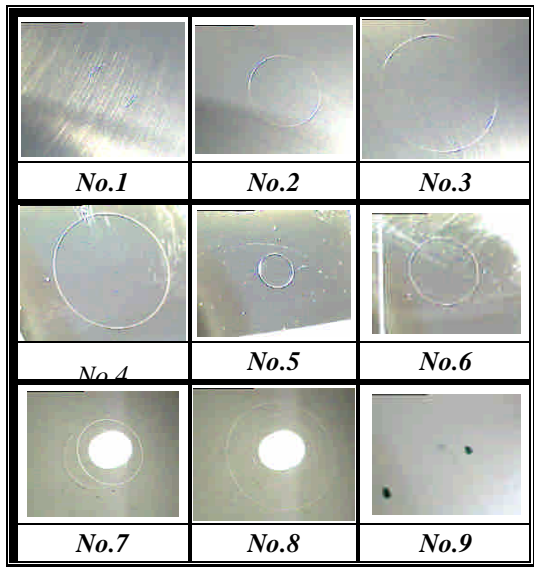


圖 6 不同製程參數作 Pin-on-Disc 實驗後試件表面圖

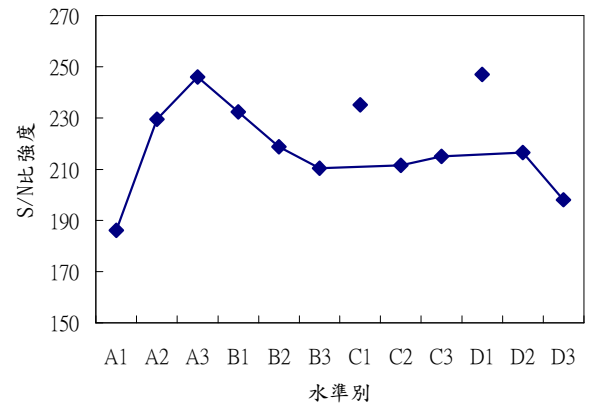


圖 9 各因素對磨耗量的回應圖

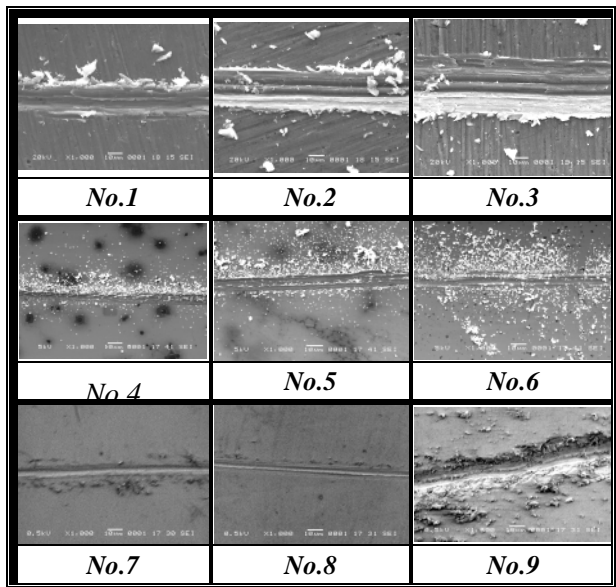


圖 7 不同製程參數作 Pin-on-Disc 實驗後 SEM 表面形貌圖

表 1 奈米磨耗實驗參數設定表

製程參數	設定值
試件材料	鋁材(Al)、矽(Si)、石英(Quartz)
施加負荷 (mN)	10、20、30
轉速 (rev/min)	10、20、30
旋轉中心距離 (μm)	1000、3000、5000
探針型式	Sharp Rockwell cone (r=25 μm)
接觸速度 (Contact velocity, $\mu\text{m/s}$)	0.5
極限停止負荷 (Limit stop load, mN)	0.52
實驗總時間 (min)	10

表 2 田口式實驗方法之直交表配置(L9)

行號 組別	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 3 摩擦係數及磨耗量之田口分析直交表配置

製程參數 組別	試件材料 A	施加負荷 B (mN)	轉速 C (rev/min)	旋轉中心 距離 D (μm)
No.1	Al	10	10	1000
No.2	Al	20	20	3000
No.3	Al	30	30	5000
No.4	Si	10	20	5000
No.5	Si	20	30	1000
No.6	Si	30	10	3000
No.7	Quartz	10	30	3000
No.8	Quartz	20	10	5000
No.9	Quartz	30	20	1000

表 4 所量得之摩擦係數數據及 S/N 比

加工條件	#1	#2	#3	#4	#5	#6	S/N比 (dB)
No.1	0.139	0.158	0.167	0.173	0.196	0.161	15.57
No.2	0.355	0.393	0.355	0.349	0.341	0.314	9.07
No.3	0.407	0.408	0.408	0.420	0.392	0.392	7.86
No.4	0.093	0.104	0.112	0.121	0.134	0.137	18.58
No.5	0.021	0.005	0.002	0.001	0.001	0.001	40.93
No.6	0.091	0.086	0.082	0.075	0.062	0.057	22.32
No.7	0.095	0.092	0.087	0.066	0.065	0.061	22.06
No.8	0.097	0.112	0.121	0.126	0.133	0.142	18.23
No.9	0.104	0.067	0.090	0.093	0.110	0.090	20.62

表 5 各因素對摩擦係數之 S/N 比回應表

因素 水準	A	B	C	D
1	32.50	56.21	56.12	77.12
2	81.82	68.23	48.27	53.45
3	60.91	50.80	70.84	44.66
Total	175.23	175.23	175.23	175.23

表 6 摩擦係數之變異數分析(ANOVA)表

因素	f (自由度)	S (變動)	V (變異)	ρ (%) (貢獻率)
A	2	408.53	204.27	55.43
B	2	53.08	26.54	7.20
C	2	87.51	43.75	11.87
D	2	187.87	93.93	25.49
Total	8	—	—	100%

表 7 所量得之磨耗量 (mm³) 數據及 S/N 比

加工條件	#1	#2	#3	#4	#5	S/N比 (dB)
No.1	0.000123 1	0.000080 1	0.000108 3	0.000120 6	0.000080 1	79.65
No.2	0.001077 6	0.001494 0	0.001120 0	0.001040 0	0.001983 9	57.14
No.3	0.002066 1	0.004111 8	0.004333 2	0.003094 5	0.002924 9	49.35
No.4	0.000274 8	0.000274 8	0.000263 8	0.000351 7	0.000401 9	69.95
No.5	0.000070 3	0.000079 1	0.000073 5	0.000070 3	0.000062 2	82.94
No.6	0.000145 1	0.000114 0	0.000147 0	0.000155 4	0.000165 8	76.68
No.7	0.000067 8	0.000130 0	0.000028 3	0.000059 3	0.000022 6	82.79
No.8	0.000050 2	0.000050 2	0.000113 0	0.000188 4	0.000113 0	78.79
No.9	0.000045 2	0.000031 1	0.000024 2	0.000098 0	0.000069 4	84.43

表 8 各因素對磨耗量之 S/N 比回應表

因素 水準	A	B	C	D
1	186.13	232.38	235.12	247.02
2	229.57	218.86	211.52	216.61
3	246.01	210.47	215.07	198.09
Total	661.71	661.71	661.71	661.71