

—蔡春泉—

直流電沉積Ni-Mo合金之製程發展及磨潤研究

提要

- 一、本研究以發展直流電沉積Ni-Mo合金耐磨鍍層為目標，利用實驗設計分析鎳鉬主鹽比例（30：1、20：1、10：1）、電流密度（2、5、10ASD）及pH值（7.5、8.5、9.5）等27組製程參數對鍍層性質影響及鍍層磨潤特性。
- 二、實驗發現直流電沉積中，在低主鹽比（10：1）、低pH值（7.5及8.5）及低電流密度（2ASD），均為原始鐵基材的表面形貌，表明此條件下，無法形成Ni-Mo鍍膜。
- 三、實驗結果顯示直流電沉積中，在高主鹽比、高pH值及低電流密度，鍍層電流效率最高，鍍層較為致密、平整，最佳參數在鎳鉬主鹽比30：1、pH值9.5及電流密度2ASD，鍍層鉬含量為11.56wt.%，鍍層硬度達618HV，鍍層增重為1.304g，平均磨耗重量損失 2.4×10^{-3} mg/m。

關鍵詞：Ni-Mo合金、磨潤、電沉積

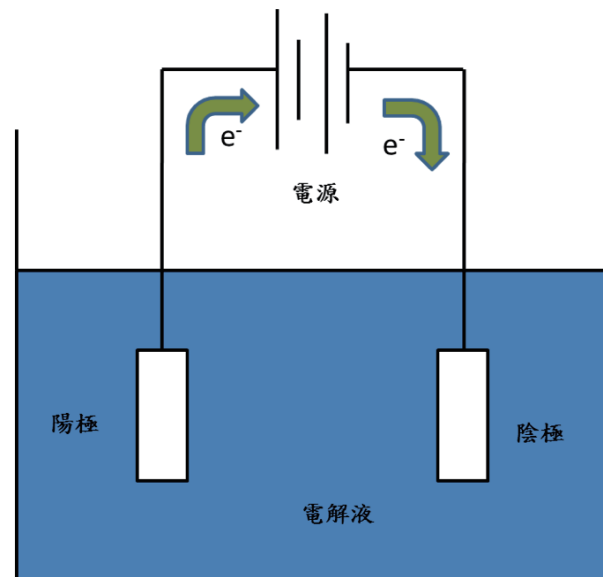
壹、前言

隨著國防預算逐年縮減，國軍各式武器建置及維修不易，系統中關鍵元件因摩擦、磨耗導致無法使用，加以因消失性商源致籌補不易，即使可以採購但單價過高或採購時間過於冗長，而使系統無法達到作戰要求因而停用。因此對於高單價、高故障率及高配換率的機件可藉由表面工程技術進行故障品修護或新、勘品易磨耗部位改良，例如：國軍飛彈系統搜索雷達傳動軸及飛彈發射架空壓機汽缸，因磨耗而無法使用，藉由電鍍再生及表面材質強化，可減少摩擦、磨耗產生之故障，延長裝備使用期限，不僅可節約經費支出，更將無商源的機件翻修為堪用品。

本研究基於上述需求，提出一結合耐磨合金電鑄製程發展與磨潤性能研析的研究，期以「直流電沉積Ni-Mo合金之製程發展及磨潤研究」作主軸，為國軍武器裝備系統延壽發展及磨潤科技發展貢獻心力。

待鍍件上進行鍍膜的化學反應。電鍍具有操作簡單、容易控制（直流變數僅有電流和電壓）及成本低（不需要昂貴的真空及儀控設備）。

電化學反應需要在電化學槽內進行，而基本電化學槽需具有陽極（Anode）、陰極（Cathode）及電解液（Electrolyte），外接電源以供應電流，電化學槽基本構造，如圖一所示。



圖一 電化學槽示意圖

（資料來源：本研究繪製）

貳、理論基礎與文獻回顧

一、電鍍原理

電鍍¹（Electroplating）利用電化學方法產生反應，於待鍍件上還原披覆一層鍍膜，與化學鍍的差異在「須經由電流的通過」，陰極

進行電化學反應時，陽極為放棄電子至外接電路，即氧化反應（Oxidation）；陰極則由外接電路吸收電子，即還原反應（Reduction）；電解液以離子的型態於兩極之間流動，如表一所示。

1 柯賢文，《表面與薄膜處理技術》（臺北：全華圖書股份有限公司，西元2005年1月1日），頁19-38。

表一 電鍍反應之基本氧化與還原式

陽極氧化反應	陰極還原反應
$M_{(s)} \rightarrow M^{n+}_{(aq)} + ne^{-}$ $4OH^{-} \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^{-}$	$M^{n+}_{(aq)} + ne^{-} \rightarrow M_{(s)}$ $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$

資料來源：本研究整理

二、合金電鍍機制

合金電鍍理論的類型：正常共沉積 (Normal deposition)、異常共沉積 (Abnormal deposition) 及誘導共沉積 (Induced deposition) 三種，而沉積的理論基礎主要取決於合金鍍液組成、² 金屬析出的標準電位³ 和誘導共沉積⁴ 等。

在正常共沉積理論中，合金的共沉積主要為：受到金屬離子的擴散及陰極電位的高低來控制等兩種方法。通常合金鍍層中，電位較正金屬的含量會隨著陰極擴散層中金屬離子總含量增高而提高，而控制電鍍操作參數對鍍層組成的影響可經由鍍液在陰極擴散層中，金屬離子濃度來預測。

異常共沉積通常無法以基本電化學理論預測，其特點是電位較負的金屬反而優先沉積，含有鐵族金屬之一個或多個的合金共沉

積大多屬此類，如Ni-Co、Fe-Co、Ni-Fe和Ni-Sn等合金，其電沉積中電位較負金屬的含量比電位較正金屬含量高。

誘導共沉積是較特別的合金沉積機制；鈦、磷、鉬及鎢等金屬鹽的水溶液無法獨自電沉積出金屬，但可以與鐵族金屬形成合金而共沉積析出還原，如鎳磷合金、鎳鎢合金和鎳鉬合金等；而誘導沉積與其他型態的共沉積理論更難推測出電鍍液中金屬的濃度和電鍍操作參數的影響。

三、磨潤基礎理論

磨潤學⁵ (Tribology) 包含摩擦 (Friction)、磨耗 (Wear) 與潤滑 (Lubrication) 的科學。摩擦是指兩相對運動物體之接觸面發生之阻力；磨耗則為物體因兩面間的相對運動造成材料逐漸流失，然而從材料表面移去材料方法有兩種，第一種是藉由化學反應的方法使材料

2 田福助，《電化學理論與應用》(臺北：高立圖書有限公司，西元1997年)，頁353。
3 沈峙聰，〈應用超臨界二氧化碳於電鍍鎳磷合金之研究〉(臺南：國立成功大學化學工程研究所碩士論文，西元2010年)，頁1-126。
4 侯光煦，〈脈衝電流電鍍Ni-P鍍層之磨潤特性研究〉(中壢：國立中央大學機械工程研究所博士論文，西元2006年)，頁1-168。
5 Stachowiak, G. W., and Batchelor, A. W., Engineering Tribology (Elsevier Butterworth Heinemann: Burlington, 2005), p. 1-9.

溶解，第二種是從表面破裂而流失，也就是機械力作用所產生的磨耗；潤滑是藉由潤滑劑作為兩固體接觸面間之緩衝介質，改善固體相對運動面相互間的磨耗。相對運動的各種機械元件都有可能發生機件磨耗。要如何減少機件磨耗，除從機械設計著手之外，對磨材料之選擇是不可或缺的，摩擦與磨耗所導致機械故障、能源損失及效能下降的花費是巨額的，藉由瞭解磨潤特性，有助於解決實際摩擦面上之損耗問題，就經濟面而言可節省龐大支出，如Bakunin⁶等在石油添加納米MoS₃添加劑可在高溫度環境下減少磨耗性能，降低摩擦係數，使石油產品有更高的燃油經濟性和效率，進而降低成本及延長機件壽命。

四、鎳鉬合金之發展

鉬元素無法在純水溶液下以電沉積方式

還原，⁷但它可以與鐵族金屬共沉積，形成合金。如果鉬合金與鐵族金屬要產生共沉積，需要在電鍍浴中含有羧酸（有機酸：就是有機物中可以釋放出氫離子者，如檸檬酸、酒石酸等）存在。根據文獻記載對於電沉積非晶的鉬合金與鐵族金屬大多數用於檸檬酸氫浴的情況，表明最好的絡合劑是檸檬酸鈉與氫一起。⁸檸檬酸在電解液中，可確保在沉積過程，pH值維持穩定。

電沉積鎳鉬合金⁹材料，具有高耐蝕性和低析氫過電位的反應，對析氫反應的應用是合適材料。具有耐腐蝕¹⁰（腐蝕介質中也含有氯離子）和耐磨耗，表現出較低的熱膨脹係數，優越的硬度及催化性能，高電化學活性和較低成本的鎳鉬合金使它們廣泛用於現代電化學工業。Ni-Mo合金本身因具有良好之強度、耐潛變性、極佳之氧化穩定性與尺度

- 6 Bakunin, V. N., Kuzmina, G. N., Kasrai, M., Parenago, O. P., and Bancroft, G. M., "Tribological Behavior and Tribofilm Composition in Lubricated Systems Containing Surface-capped Molybdenum Sulfide Nanoparticles," *Tribology Letters*, Vol. 22, No. 3 (2006), p. 289.
- 7 Sanches, L. S., Domingues, S. H., Marino, C. E. B., and Mascaro, L. H., "Characterisation of Electrochemically Deposited Ni-Mo Alloy Coatings," *Electrochemistry Communications*, Vol. 6 (2004), p. 543-548.
- 8 Chassaing, E., Roumegas, M. P., and Trichet, M. F., "Electrodeposition of Ni-Mo Alloys with Pulse Reverse Potentials," *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 25 (1995), p. 667-670.
- 9 Sanches, L. S., Domingues, S. H., Carubelli, A., and Mascaro, L. H., "Electrodeposition of Ni-Mo and Fe-Mo Alloys from Sulfate-Citrate Acid Solutions," *J. Brazilian Chem. Soc.*, Vol. 14 (2003), p. 556.
- 10 Hu, C. C., and Weng, C. Y., "Hydrogen Evolving Activity on Nickel-molybdenum Deposits Using Experimental Strategies," *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 30 (2000), p. 499-503.

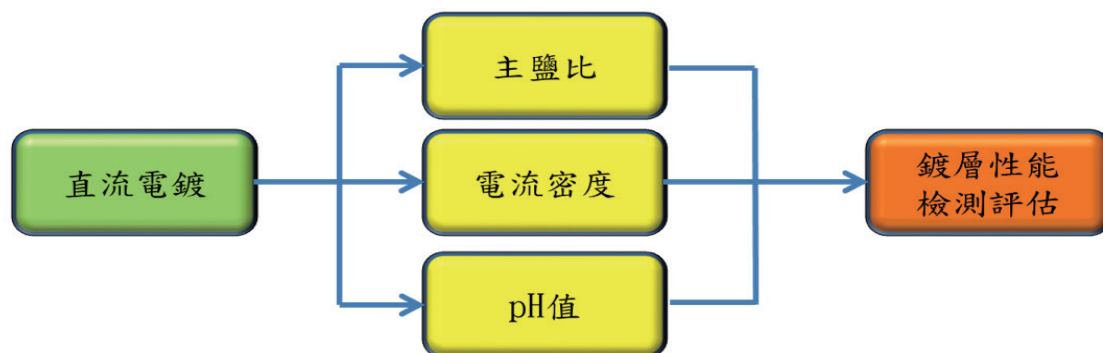
穩定性，故極適合被應用於高溫環境；美國NASA組織的研究¹¹顯示高溫固態潤滑鍍層PS400，是以70wt.%Ni-Mo-Al合金粉末添加20wt.%Cr₂O₃、5wt.%銀及5wt.%氟化物再行以電漿熔噴技術製作鍍層，用於提升鍍層在高溫環境下的磨潤性能，實驗結果Ni-Mo合金在650°C的環境的磨潤測試能滿足航太性能需求，其高溫環境的摩擦係數及磨耗皆低於常溫下的測試結果。

Hazar¹²應用鉬金屬作為熱阻層，以電漿熔噴技術，將鉬噴覆於柴油引擎汽缸頭、排氣閥、活塞及進氣閥等元件表面，作為絕熱層以防止混合氣燃燒後的熱損失，可改善使用生質柴油時因油料熱值較低，燃燒後產生動力亦相對下降的情況，證實元件噴覆鉬金屬後的動力性能及減汙能力均較原引擎為佳。

參、實驗方法

以直流電鍍方式發展鎳鉬合金，利用三因子三水準全因子實驗設計規劃，探討由不同主鹽比、電流密度及pH值實驗，共27組製程參數，對鍍層性質影響及鍍層磨潤特性來評估最佳製程參數。

鎳鉬合金鍍層發展先以鐵片為施鍍基材，鍍層分析以背向式電子顯微鏡SEM觀察鍍層表面形貌及橫截面，並以電子探測微分析儀EPMA檢測Ni及Mo含量機械性質以維氏硬度儀器檢測鍍層硬度，再以往復式磨耗實驗機檢測摩擦係數、磨耗特性，實驗中僅實施對磨球與鍍層間連續乾摩擦，實驗流程圖如圖二所示。



圖二 實驗流程圖

(資料來源：本研究繪製)

- 11 DellaCorte, C., and Edmonds, B. J., "NASA PS400: A New High Temperature Solid Lubricant Coating for High Temperature Wear Applications," NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, TM-2009-215678 (2009), p. 2-9.
- 12 Hazar, H., "Cotton Methyl Ester Usage in a Diesel Engine Equipped with Insulated Combustion Chamber," Applied Energy, Vol. 87 (2010), p. 134-140.

肆、結果與討論

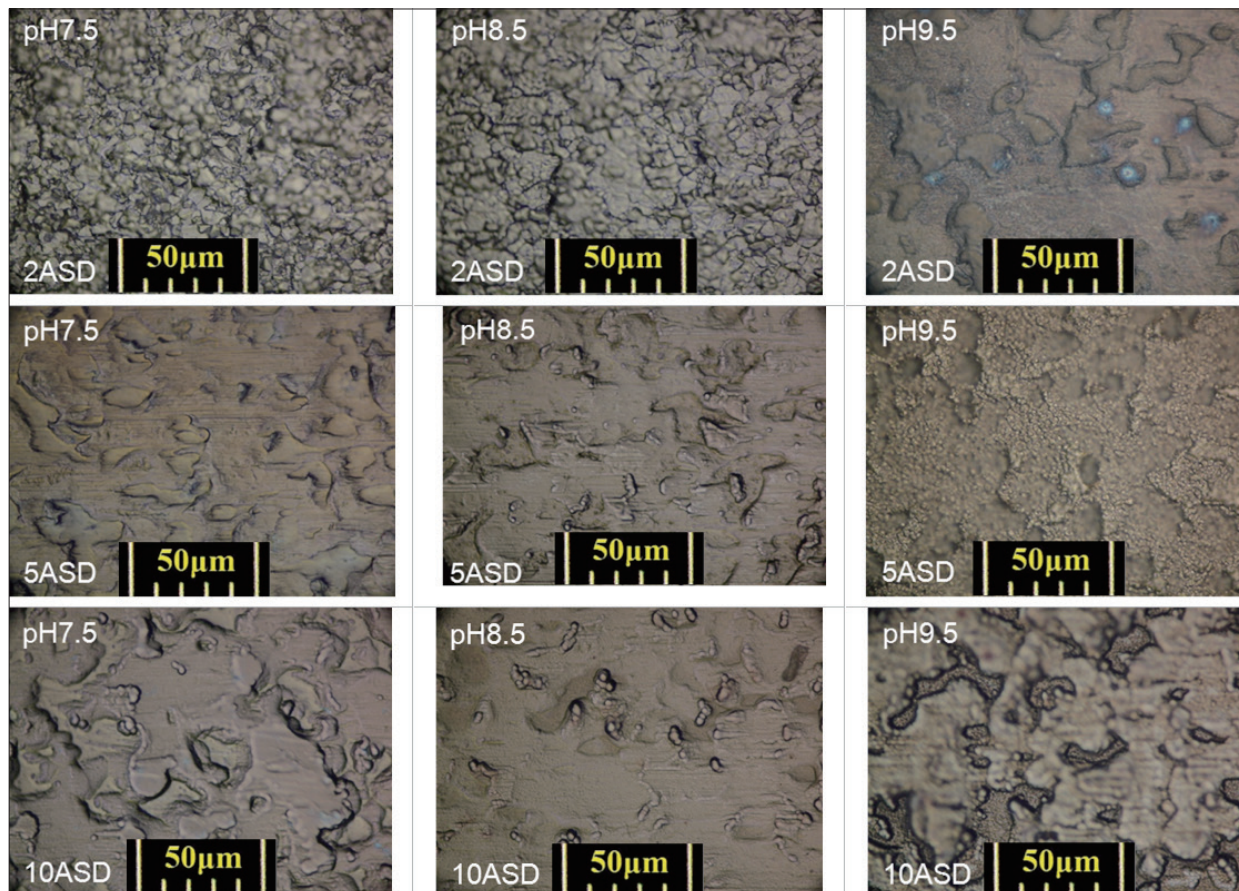
一、鎳鉬主鹽比10:1，電流密度與pH值對鍍層影響

本節為研究直流電沉積中鎳鉬主鹽比10:1下，鉬酸鹽固定0.004M，電流密度2、5、10ASD與pH值7.5、8.5、9.5共9組數據，對還原Ni-Mo鍍層在系統中之影響，在相同通電總量5850C下，分別針對表面形貌、硬度、粗糙度、鍍層增重（或鍍層厚度）及鍍層Mo含量成分進行分析，並以STATISTICA軟體進行分析

後，繪製三維響應曲面圖與波德圖。

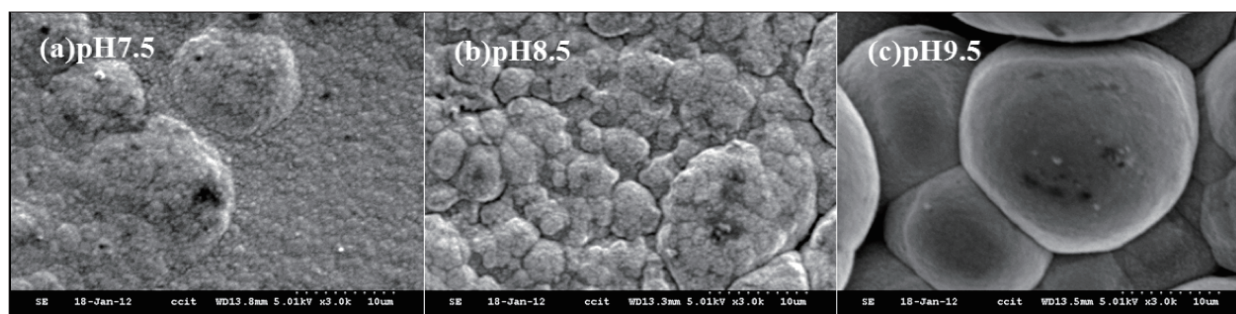
鍍層表面形貌如圖三所示，在電流密度2ASD下，可明顯看出僅在pH值9.5下，鍍層表面形貌較為平整，另pH值7.5、8.5均為原始鐵基材的表面形貌，表明低電流密度下，高pH值表面形貌較平整。在電流密度5ASD下，在pH值9.5下有微結節狀產生且緻密，另pH值7.5、8.5為島狀結構但較為平整。在電流密度10ASD下，有隨pH值增加，其島狀與結節狀增加，有較大結節狀產生，如圖四。

Ni-Mo鍍層橫截面硬度範圍在158~



圖三 鎳鉬主鹽比10:1，鍍層表面形貌OM圖

（資料來源：本研究繪製）



圖四 鎳鉬主鹽比10:1及10ASD，表面形貌SEM圖

(資料來源：本研究繪製)

647HV，顯示鍍層硬度在高電流密度有較佳表現；在低電流密度下，pH值7.5、8.5對硬度值的影響不大，硬度值分別為158、207HV，與鐵基材140HV硬度相近，表明此條件下不易鍍層生成，最高的硬度在10ASD及pH值7.5為647HV。

表二顯示，鍍層表面粗糙度範圍在0.829~2.501 μm ，鍍層粗糙度在pH值9.5較高，可能是因為表面形成島狀與結節狀結構所致（如圖三），顯示pH值影響粗糙度最為顯著，呈現正相關，表明pH值越高粗糙度越高，其信賴程度達95%；最低的粗糙度在pH值7.5、2ASD為0.829 μm 。

鍍層增重範圍在0.040~0.626g（膜厚1.00~35.26 μm ），在低電流密度及低pH值下不易於鍍層成長；由表二顯示，pH值線性效應及電流密度線性效應與二次效應對鍍層增重影響最為顯著，均呈現正相關，表明pH值及電流密度越高鍍層增重越佳，最高的增重在pH值9.5、5ASD為0.626g。

鍍層Mo含量範圍在10.61~27.83wt.%，顯示在低pH值及低電流密度下鍍層Mo含量較

高，且有隨著電流密度增加而減少趨勢，但是此條件下鍍層成長較差。表二顯示，pH值及電流密度對鍍層Mo含量影響最為顯著，均呈負相關，其信賴程度達95%，表明在高pH值及高電流密度下，鍍層Mo含量較低。

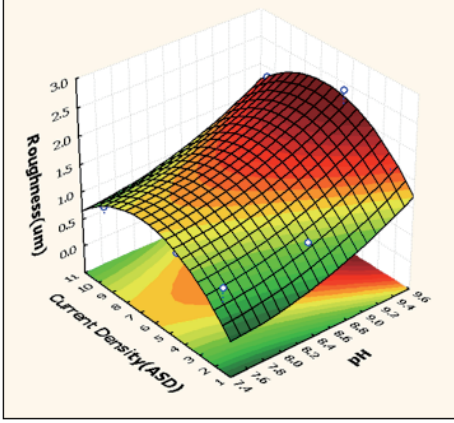
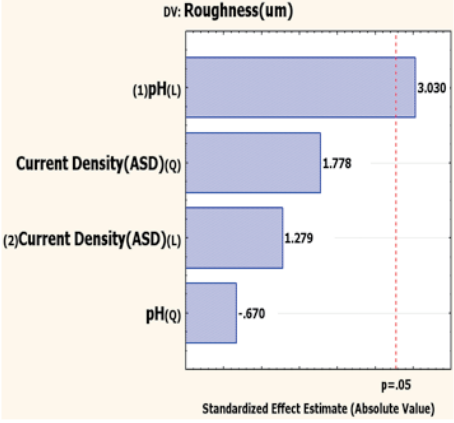
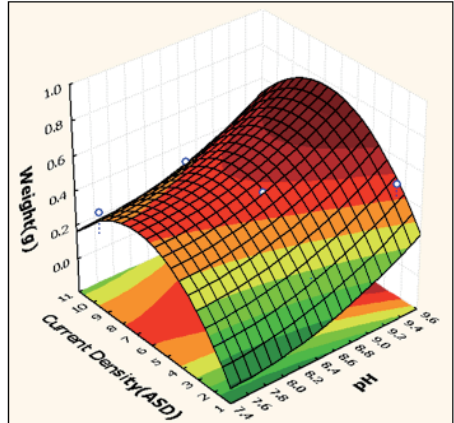
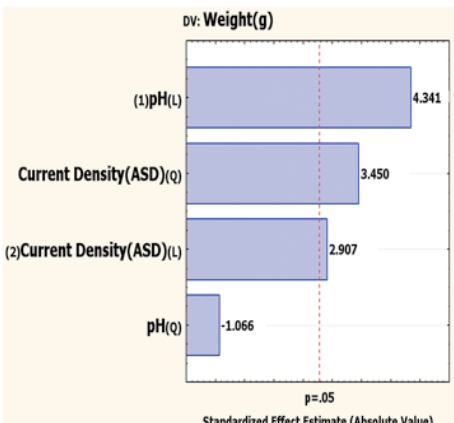
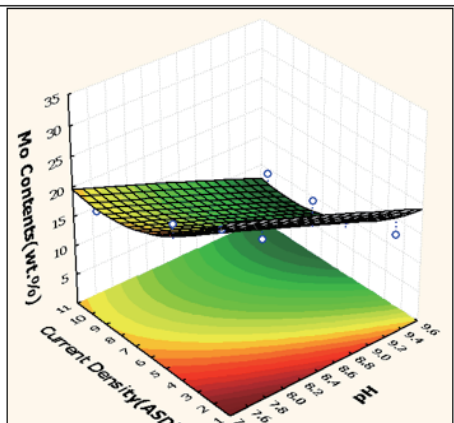
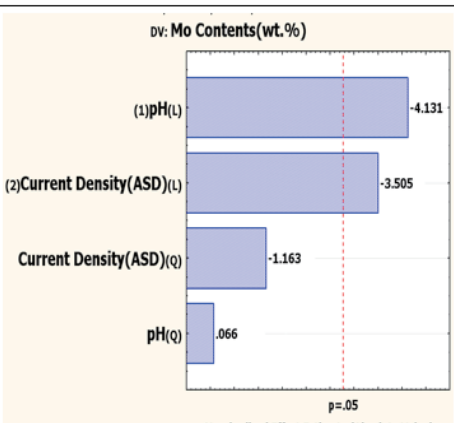
二、鎳鉬主鹽比20:1，電流密度與pH值對鍍層影響

本節為研究直流電沉積中鎳鉬主鹽比20:1下，電流密度與pH值對還原Ni-Mo鍍層中之影響，在相同通電總量5850C下，分別針對表面形貌、硬度、粗糙度、鍍層增重（鍍層厚度）及鍍層成分進行分析。

鍍層表面形貌OM圖如圖五所示，在電流密度2ASD下，pH值7.5、8.5由於應力過大造成表面大範圍破裂及脫落，僅pH值9.5有較佳的表現，如圖六(a)所示。在電流密度5、10ASD下，隨著pH值增加鍍層表面從島狀結構改變呈結節狀，且在pH值9.5、10ASD下，有隨電流密度增加，結節狀及裂縫更加明顯，如圖六(b)及(c)。

由表三顯示，Ni-Mo鍍層表面硬度範圍在180~812HV，鍍層硬度在高電流密度較佳；

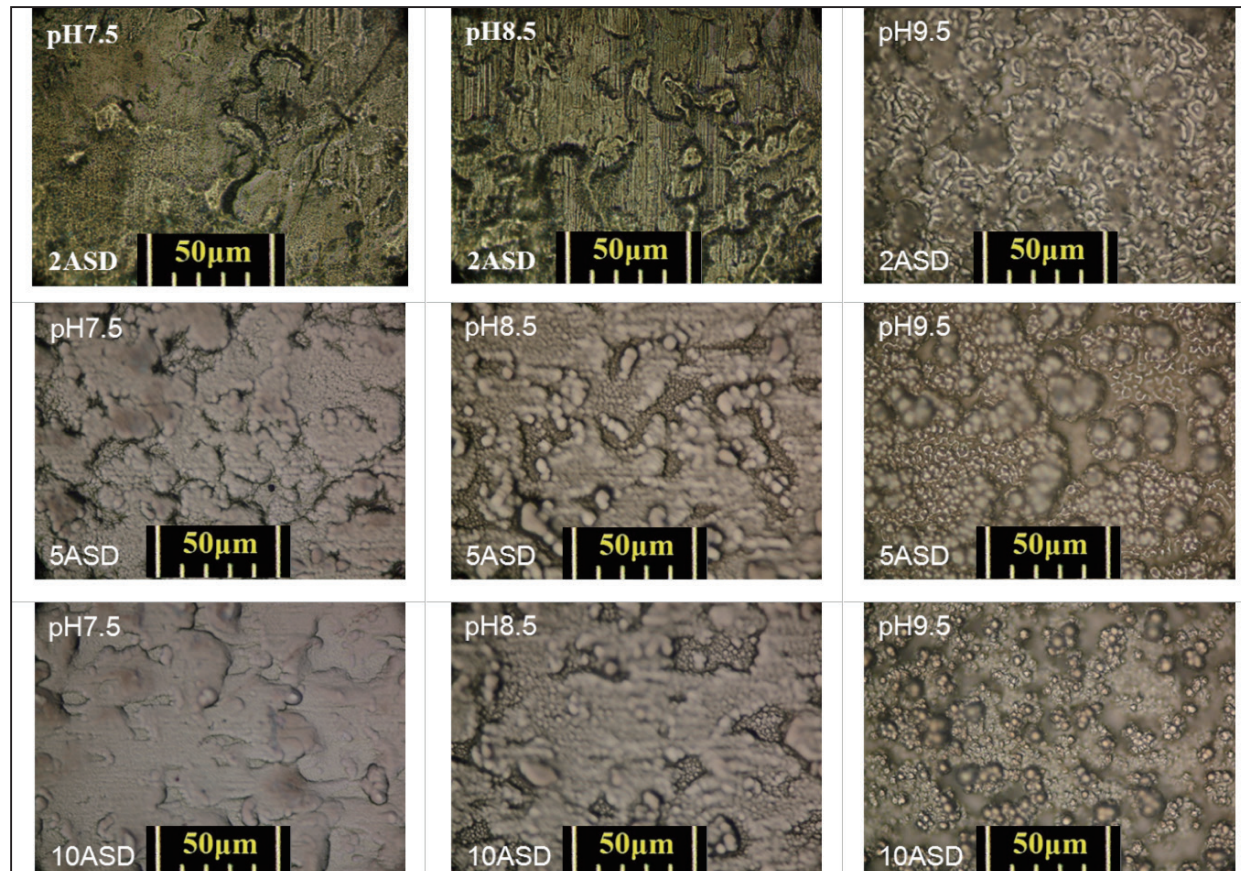
表二 鎳鉬主鹽比10:1，電流密度與pH值對鍍層影響

對應實驗參數之響應曲面圖	對應實驗參數之波德圖
 鍍層粗糙度	 鍍層粗糙度
 鍍層增重	 鍍層增重
 鍍層 Mo 含量	 鍍層 Mo 含量

資料來源：本研究整理

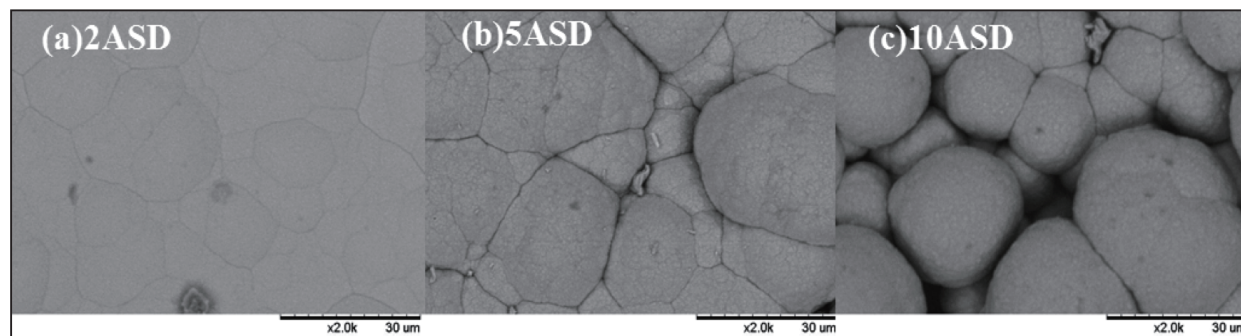
低電流密度下，在pH值7.5及8.5，鍍層增重為0.402g及0.882g，由於應力過大造成Ni-Mo合金破裂，無法順利附著於基材上，因此無法

準確測出此條件合金的硬度，脫落後的表面硬度值為180及220HV，與鐵基材140HV硬度相近；在pH值9.5時，硬度可達592HV，表明



圖五 鎳鉬主鹽比20:1，鍍層表面形貌OM圖

(資料來源：本研究繪製)



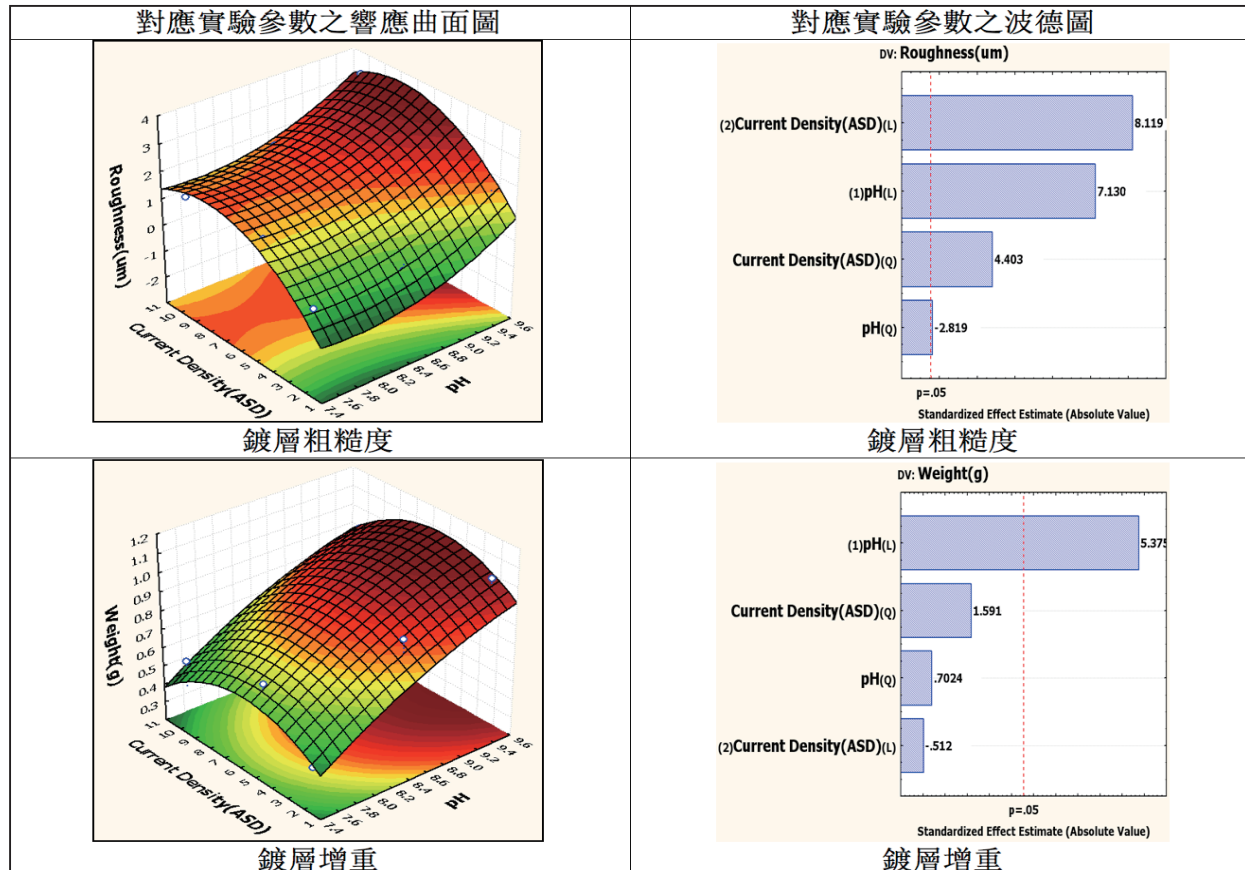
圖六 鎳鉬主鹽比20:1及pH值9.5，鍍層表面形貌SEM圖

(資料來源：本研究繪製)

高pH值有助於低電流密度的沉積與附著，最高的硬度在10ASD、pH值7.5為812HV。

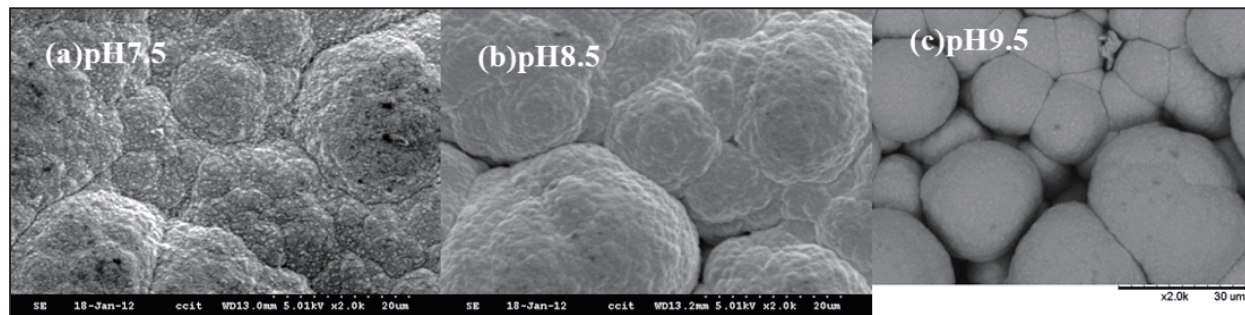
表三顯示，鍍層表面粗糙度範圍在1.197~

3.443 μm ，在高電流密度鍍層粗糙度較高，有隨pH值增加而增加趨勢，可能是因為表面形成結節狀結構所致（如圖七），顯示pH



表三 鎳鉬主鹽比20:1，電流密度與pH值對鍍層影響

（資料來源：本研究繪製）



圖七 鎳鉬主鹽比20:1及10ASD，鍍層表面形貌SEM圖

（資料來源：本研究繪製）

值線性效應及電流密度線性效應與二次效應對鍍層粗糙度影響最為顯著，均呈現正相關，表明pH值及電流密度越高鍍層粗糙度越高，最低的粗糙度在pH值9.5及2ASD為1.197 μm 。

鍍層增重範圍在0.402~1.024g（鍍層厚度32.63~50.00 μm ），與鎳鉬主鹽比10：1相比較，鍍層增重及鍍層厚度有大幅度的增加趨勢，表三可明顯看出pH值越高鍍層重量增加越多，最多的增重在pH值9.5、2ASD為1.024g，顯示pH值影響增重最為顯著，呈現正相關，表明pH值越高增重越多，其信賴程度達95 %。

鍍層成分Mo含量範圍在1.91~11.00wt.%，與鎳鉬主鹽比10：1相比較，鍍層Mo含量有大幅度的減少趨勢。在pH值9.5與不同電流密度下2、5、10ASD，其鍍層中Mo含量及電流效率有隨著電流密度增加而減少趨勢，由表四所

示，電鍍鎳鉬合金鍍層Mo含量及電流效率在低電流密度2ASD有較佳的表現。

三、鎳鉬主鹽比30：1，電流密度與pH值對鍍層影響

本節為研究直流電沉積中鎳鉬主鹽比30：1下，電流密度與pH值對還原Ni-Mo鍍層在系統中之影響，在相同通電總量5850C下，分別針對表面形貌、橫截面、硬度、粗糙度、鍍層增重及鍍層成分、進行分析。

微結構表面形貌OM如圖八（a）顯示在pH值7.5，10ASD時較為平坦及裂縫產生，相同電流密度下，當pH值增加至pH值9.5表面僅出現凹坑，如圖八（b），Sanches¹³等人說明此種凹坑、多孔結構可以歸結為氧化鉬沉積，此時pH值增加有助於裂縫的減少。

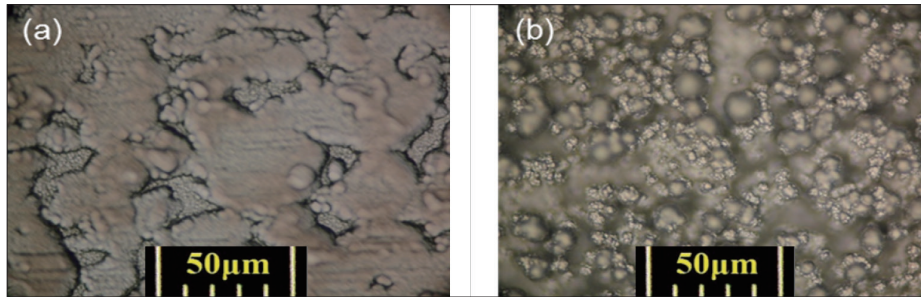
微結構表面形貌SEM如圖九（a）顯示在pH值9.5，2ASD時，表面較緻密平整；在相同pH值下，當電流密度增加至10ASD時，表面產

表四 鎳鉬主鹽比20：1、pH值9.5、不同電流密度下之鍍層Mo含量及電流效率

電流密度ASD	Mo含量wt.%	電流效率%
2	8.91	59.99
5	7.42	59.22
10	6.06	53.59

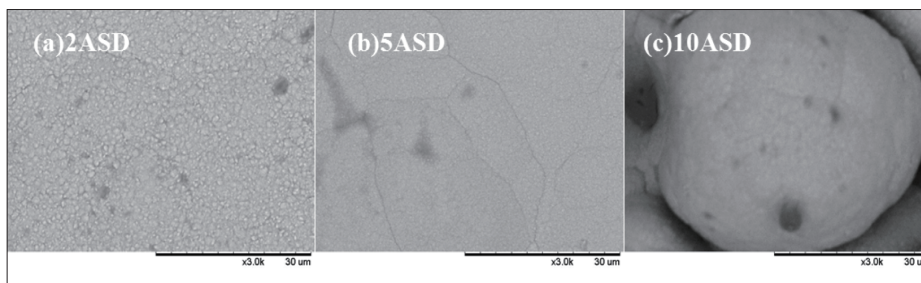
資料來源：本研究整理

13 Sanches, L. S., Domingues, S. H., Marino, C. E. B., and Mascaro, L. H., “Characterisation of Electrochemically Deposited Ni-Mo Alloy Coatings,” *Electrochemistry Communications*, Vol. 6, p. 543-548, 2004.



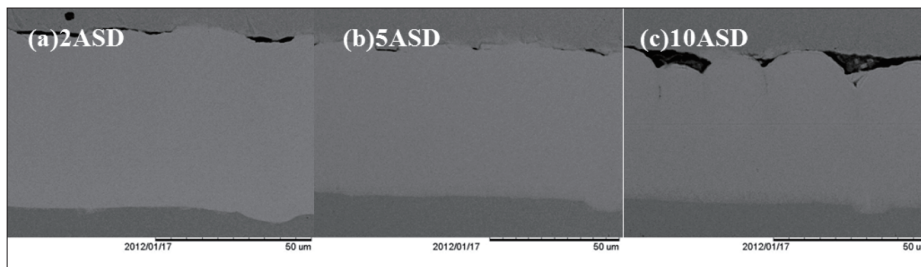
圖八 鎳鉬主鹽比30:1, 表面形貌OM圖

(資料來源: 本研究繪製)



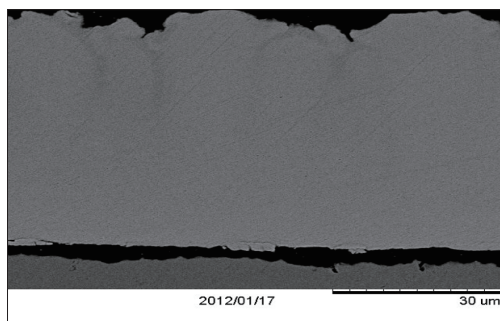
圖九 鎳鉬主鹽比30:1及pH值9.5, 表面形貌SEM圖

(資料來源: 本研究繪製)



圖十 鎳鉬主鹽比30:1, 鍍層橫截面SEM圖

(資料來源: 本研究繪製)



圖十一 鎳鉬主鹽比30:1、pH值7.5及2ASD, 鍍層橫截面SEM圖

(資料來源: 本研究繪製)

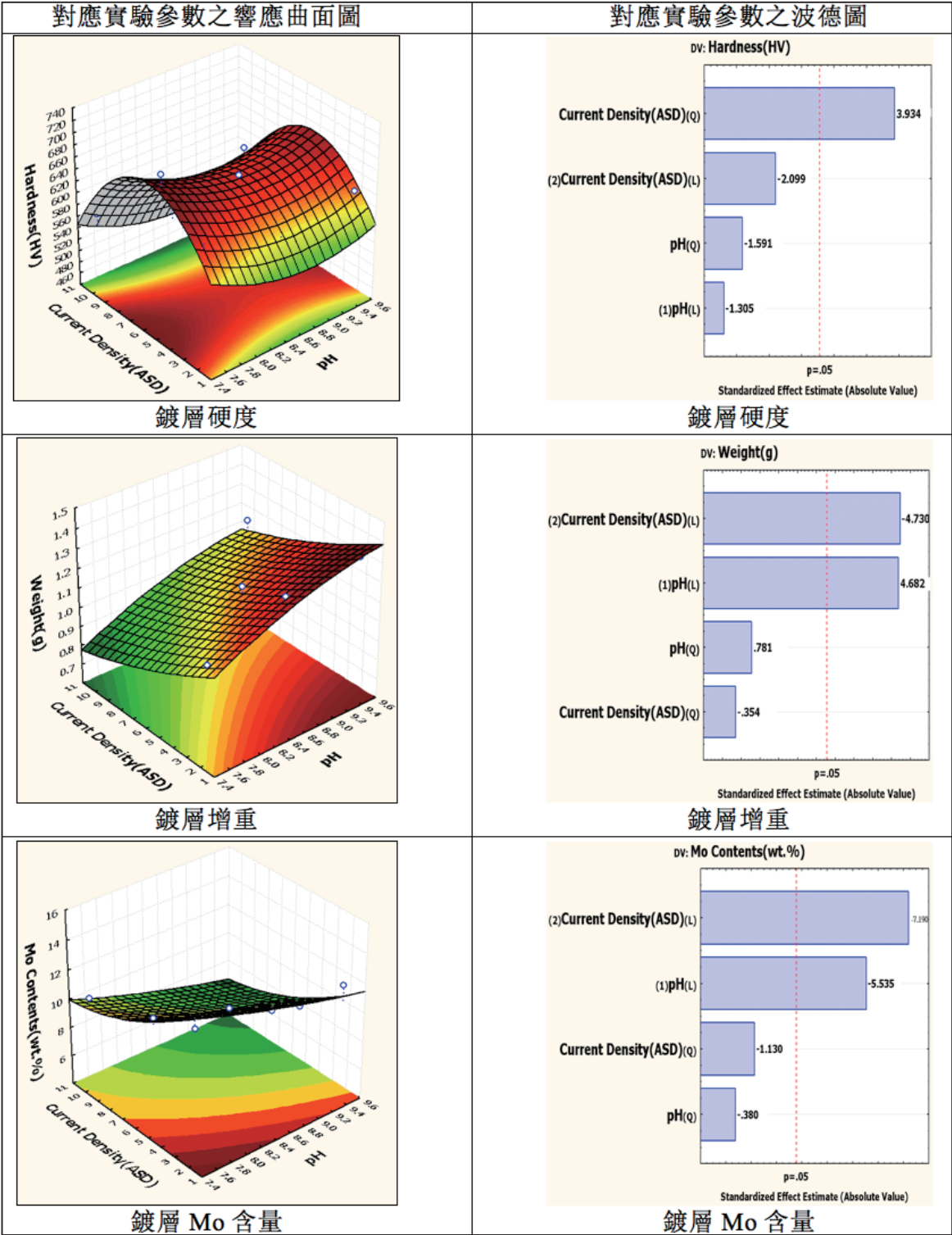
生大結節球狀及更明顯的裂縫，如圖九(c)，此時電流密度增加，導致結節球狀及裂縫產生，在此表明低電流密度有較佳的表面形貌。

微結構橫截面SEM如圖十(a)顯示在pH值9.5, 2ASD時，在橫截面鍍層沉積 $71.83\mu\text{m}$ 較優於10ASD鍍層沉積 $52.82\mu\text{m}$ ，如圖十(c)，且在10ASD鍍層沉積橫截面有凹凸不平及裂縫產生，在鍍層沉積厚度有隨著電流密度增加而減少趨勢。

另在pH值7.5, 2ASD條件下，鍍層與基材有明顯剝離現象，表明此條件合金附著性較差，如圖十一所示。

Ni-Mo鍍層表面硬度範圍在539~711HV，如表五顯示在5ASD有較高的硬度值。電流密度二次效應為對鍍層硬度影響最為顯著，呈正相關。最佳的硬度在pH值7.5、5ASD為711HV，但此條件鍍層與基材有剝離現象。

表五 鎳鉬主鹽比30:1，電流密度與pH值對鍍層影響



資料來源：本研究整理

鍍層粗糙度範圍在 $0.885\sim 2.850\mu\text{m}$ ，如表五顯示呈上拋曲線，在電流密度2、10ASD，其粗糙度均較低，另在5ASD時，其粗糙度均較高。最低的粗糙度在pH值9.5及2ASD為 $0.885\mu\text{m}$ 。

鍍層增重範圍在 $0.808\sim 1.304\text{g}$ （鍍層厚度 $34.21\sim 71.83\mu\text{m}$ ），如表五中顯示，鍍層增重有隨著pH值增加而增加的趨勢，且隨著電流密度增加而減少的趨勢。在實驗過程中亦發現pH值增加，其析氫有大幅減少現象，此說明電流效率將有提高的機會，其中在2ASD時更加明顯，在此表明電鍍鎳鉬合金鍍層成長比較適合在低電流密度2ASD、高pH值（pH值9.5）。另由表五所示，電流密度對鍍層增重影響為負相關，表明電流密度越高鍍層增重越少；pH值對鍍層增重影響為正相關，表明pH值越高鍍層增重越多。最佳的鍍層增重及厚度均在pH值9.5、2ASD為 1.304g 與 $71.83\mu\text{m}$ 。

鍍層成分Mo含量範圍在 $6.66\sim 13.13\text{wt.}\%$ ，如表五所示，表明在低電流密度有較高的Mo含量。另由表五所示，電流密度對鍍層Mo含量影響為負相關，表明電流密度越高鍍層Mo

含量越少。pH值對鍍層Mo含量影響為負相關，表明pH值越高鍍層Mo含量越少，在pH值9.5與不同電流密度下2、5、10ASD，其鍍層中Mo含量及電流效率有隨著電流密度增加而減少趨勢，如表六所示，表明電鍍鎳鉬合金鍍層Mo含量及電流效率在低電流密度2ASD有較佳的表現。

四、直流電鍍Ni-Mo鍍層磨潤實驗分析

本實驗下試件選用直流電鍍不同主鹽比之鎳鉬鍍層，分別對甫鍍態之試件實施磨耗試驗，實驗荷重為定荷重10N，轉速為定轉速960rpm（線速度 32mm/s ），滑動距離 115.2m ，對磨上試件為氧化鋁球（ $\approx 1200\text{HV}$ ）。在圖十二鍍層之摩擦係數曲線與磨耗型態圖形中，（a）為該條件摩擦係數曲線圖，（b）為100倍OM磨耗圖，（c）為500倍磨耗長軸邊緣SEM圖，（d）為1,000倍磨耗中央SEM圖。

表七顯示氧化鋁球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比10:1鍍層乾摩擦實驗數據於常溫下測試的摩擦係數，Ni-Mo鍍層試件在甫鍍態之平均表面粗糙度範圍為 $0.829\sim 2.504\mu\text{m}$ 、平均硬度範圍為 $158\sim 647\text{HV}$ 、平均摩擦係數範圍為 $0.275\sim 0.513$ ，平均磨耗重量損失範圍為

表六 鎳鉬主鹽比30:1、pH值9.5、不同電流密度下之鍍層Mo含量及電流效率率

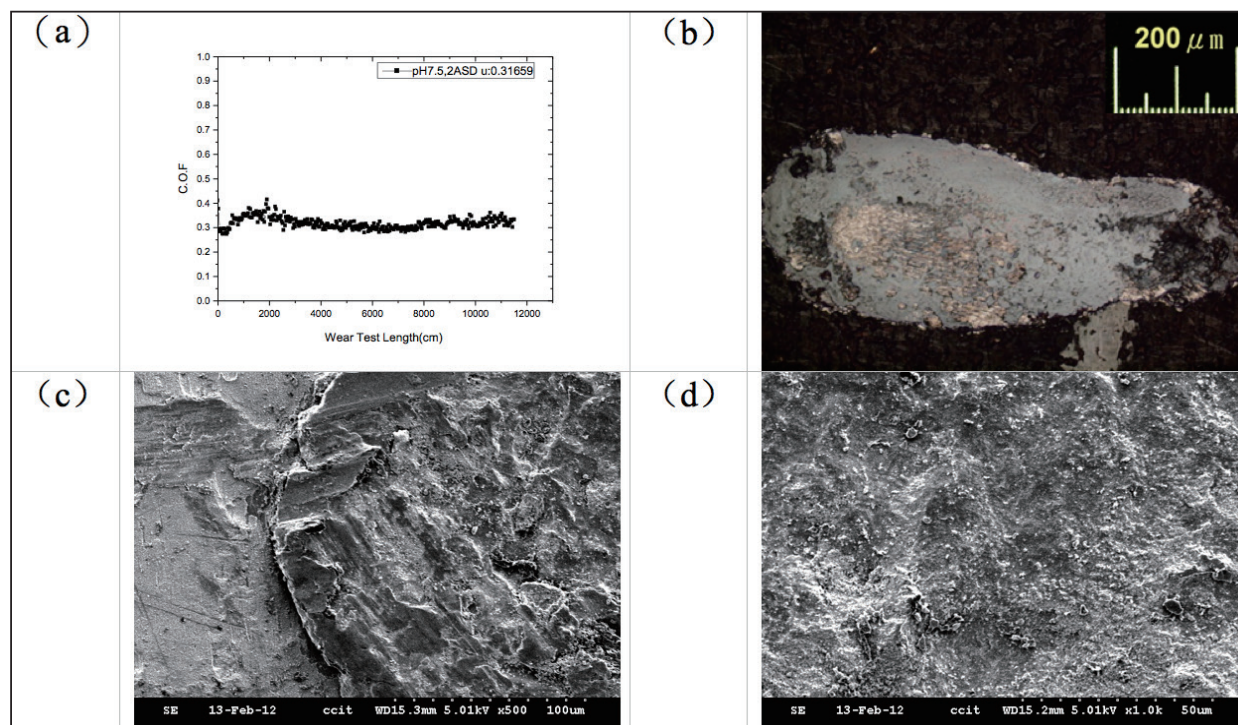
電流密度ASD	Mo含量 wt.%	電流效率%
2	11.56	78.50
5	8.31	69.17
10	6.66	67.25

資料來源：本研究整理

表七 氧化鋁球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比10:1鍍層乾摩擦實驗數據

Ni-Mo試件		鍍層中 Mo含量 (wt%)	表面粗糙度 (μm)	鍍層硬度 (HV)	平均磨耗重量 損失 (mg/m)	平均摩擦係數 (μ)
pH值	ASD					
7.5	2	27.83	0.842	158	2.2×10^{-3}	0.317
7.5	5	23.49	0.900	493	4.9×10^{-3}	0.513
7.5	10	16.90	0.829	647	5.1×10^{-3}	0.366
8.5	2	25.90	0.943	207	20.1×10^{-3}	0.293
8.5	5	14.36	1.315	633	2.3×10^{-3}	0.502
8.5	10	11.94	1.204	579	9.1×10^{-3}	0.367
9.5	2	13.69	0.993	521	6.6×10^{-3}	0.457
9.5	5	10.95	2.504	566	3.0×10^{-3}	0.275
9.5	10	10.61	1.964	554	3.6×10^{-3}	0.316

資料來源：本研究整理



圖十二 鎳鉬主鹽比10:1、pH值7.5及2ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)

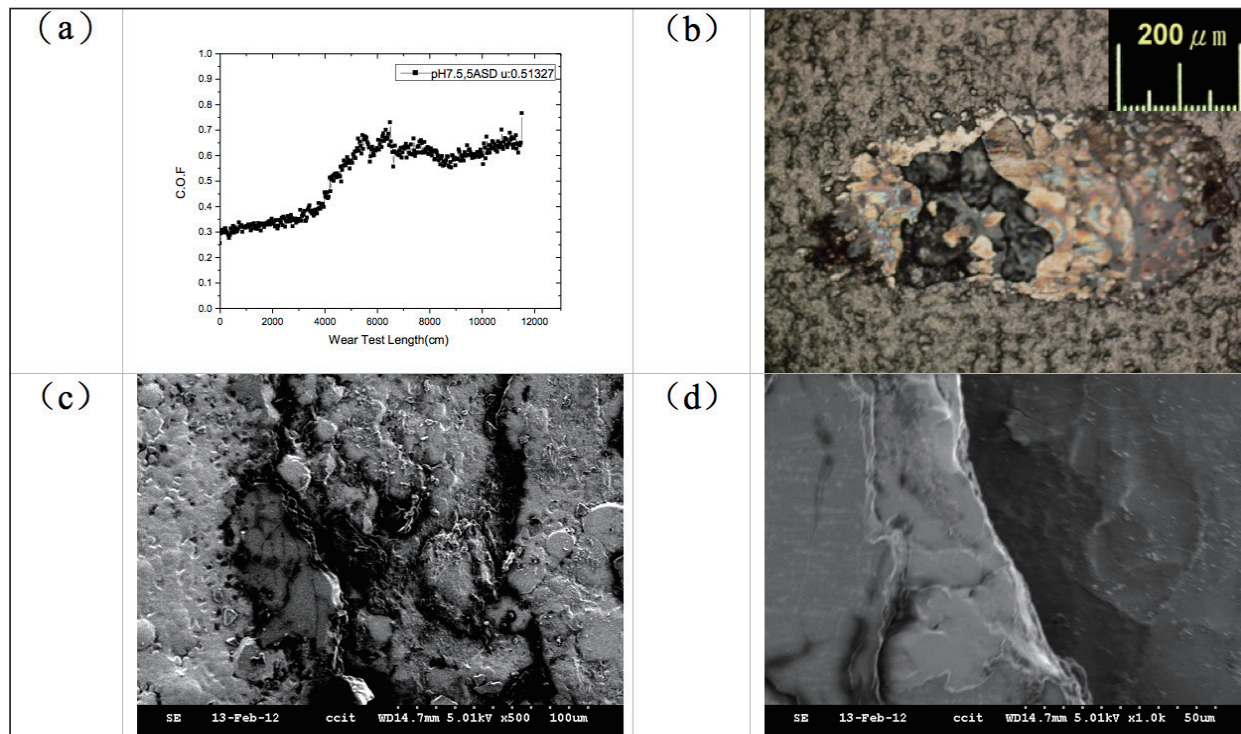
$2.2 \times 10^{-3} \sim 20.1 \times 10^{-3} \text{ mg/m}$ 。

圖十二顯示，摩擦係數曲線圖相當平穩，可能是由於此條件下幾乎沒有合金鍍層，微量Ni-Mo和鐵基材混和磨耗狀況，其表面形貌有窪坑、材料的剝離及黏著磨耗產生。圖十三顯示，摩擦係數曲線圖大約在40m處有大幅上升趨勢，可能是由於鍍層遭磨穿所導致，與其表面形貌有大範圍脫落現象及黏著磨耗相符。圖十四顯示，摩擦係數曲線圖相當平穩，可能由於其粗糙度最小及硬度最高的原因所致，但從表面形貌仍可以看出些許塑性變形及塊狀脫落，導致磨耗較大。圖十五顯示，雖然結節狀表面粗糙度大，但是

與對磨球接觸面積變小，且硬度亦有566HV，故其耐磨性表現佳導致摩擦係數低。

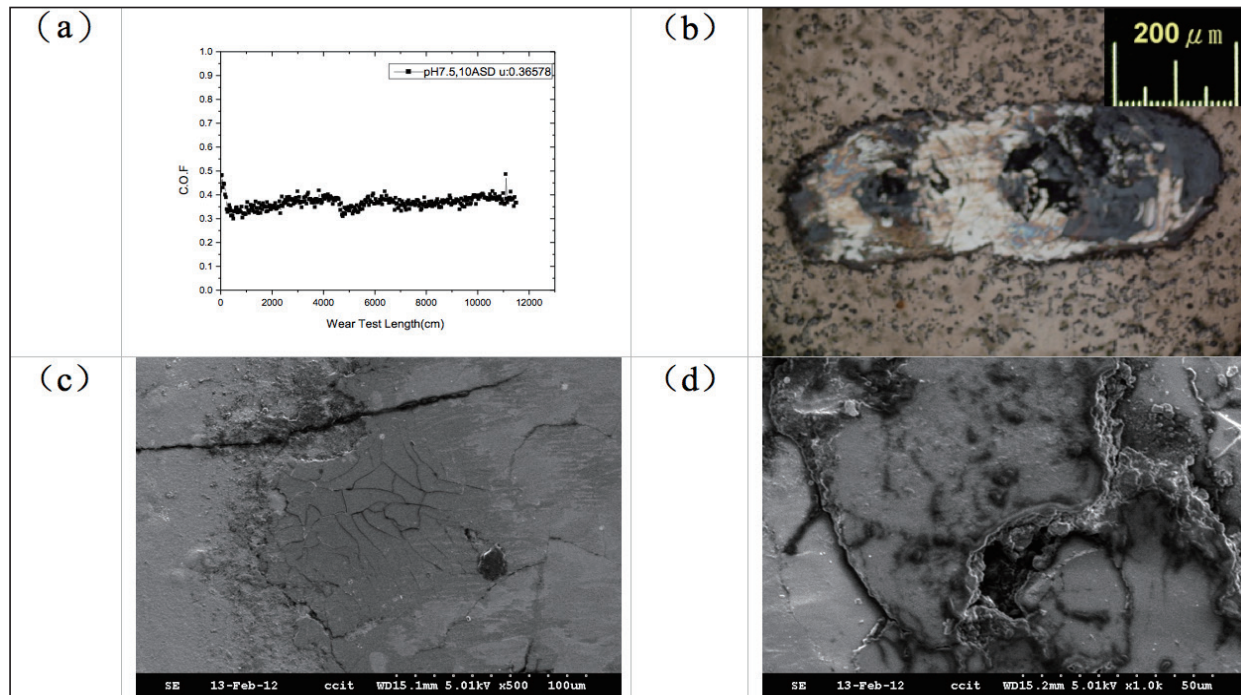
表八顯示氧化鉛球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比20:1鍍層乾摩擦實驗數據於常溫下測試的摩擦係數，Ni-Mo鍍層試件在甫鍍態之平均表面粗糙度範圍為 $1.197 \sim 3.443 \mu\text{m}$ 、平均硬度範圍為180~812HV、平均摩擦係數範圍為0.227~0.526，平均磨耗重量損失範圍為 $2.3 \times 10^{-3} \sim 8.9 \times 10^{-3} \text{ mg/m}$ 。

圖十六顯示，摩擦係數曲線圖於40m處有明顯上升趨勢，可能是由對磨球與鍍層黏著磨耗產生，與表面形貌相符合。圖十七顯示，摩擦係數曲線圖大約在70m處有大幅上



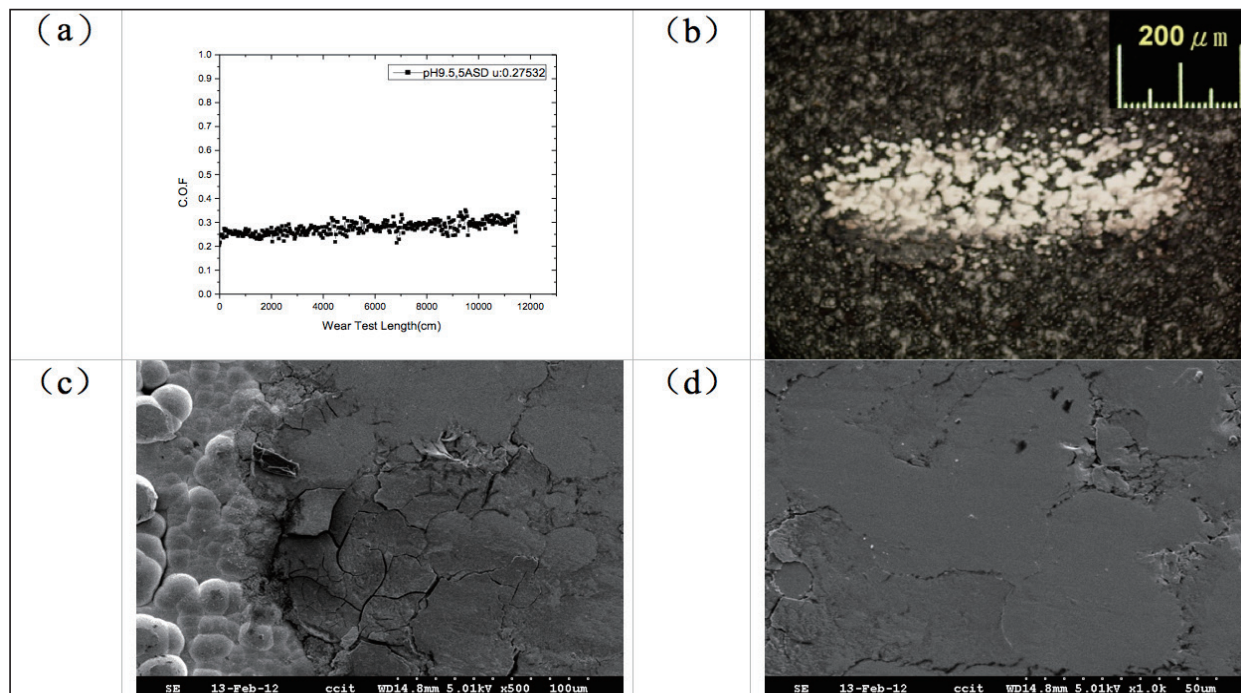
圖十三 鎳鉬主鹽比10:1、pH值7.5及5ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



圖十四 鎳鉬主鹽比10:1、pH值7.5及10ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



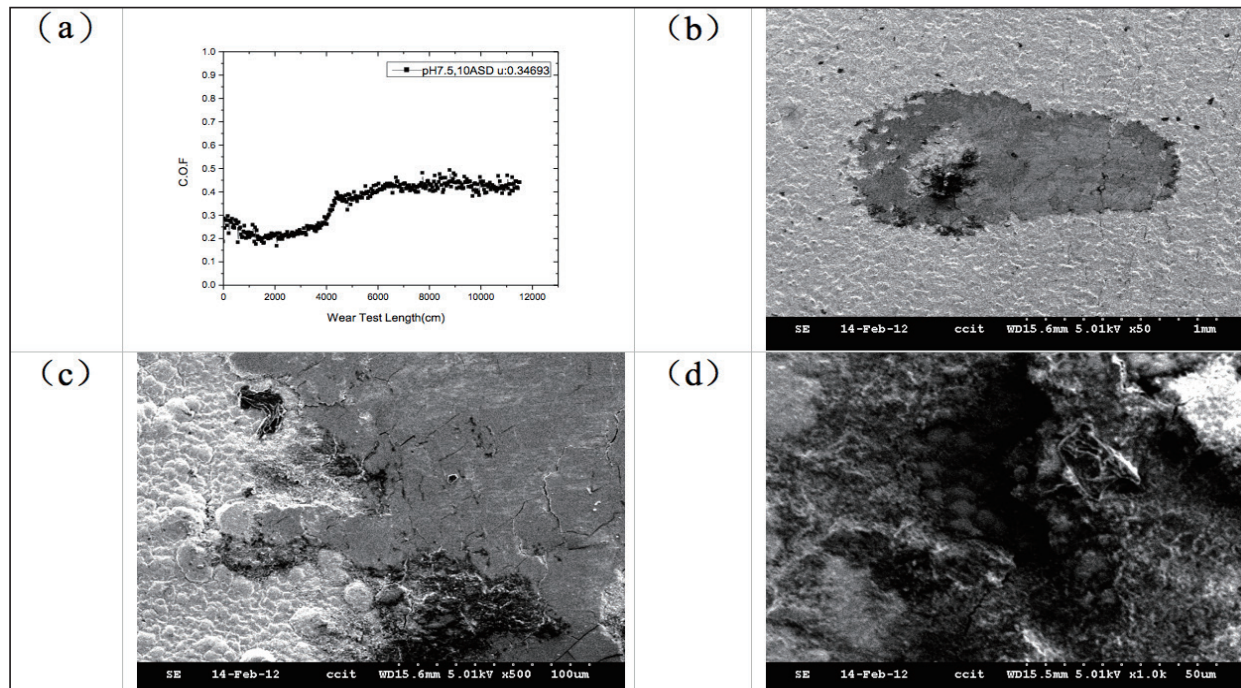
圖十五 鎳鉬主鹽比10:1、pH值9.5及5ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)

表八 氧化鋁球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比20:1鍍層乾摩擦實驗數據

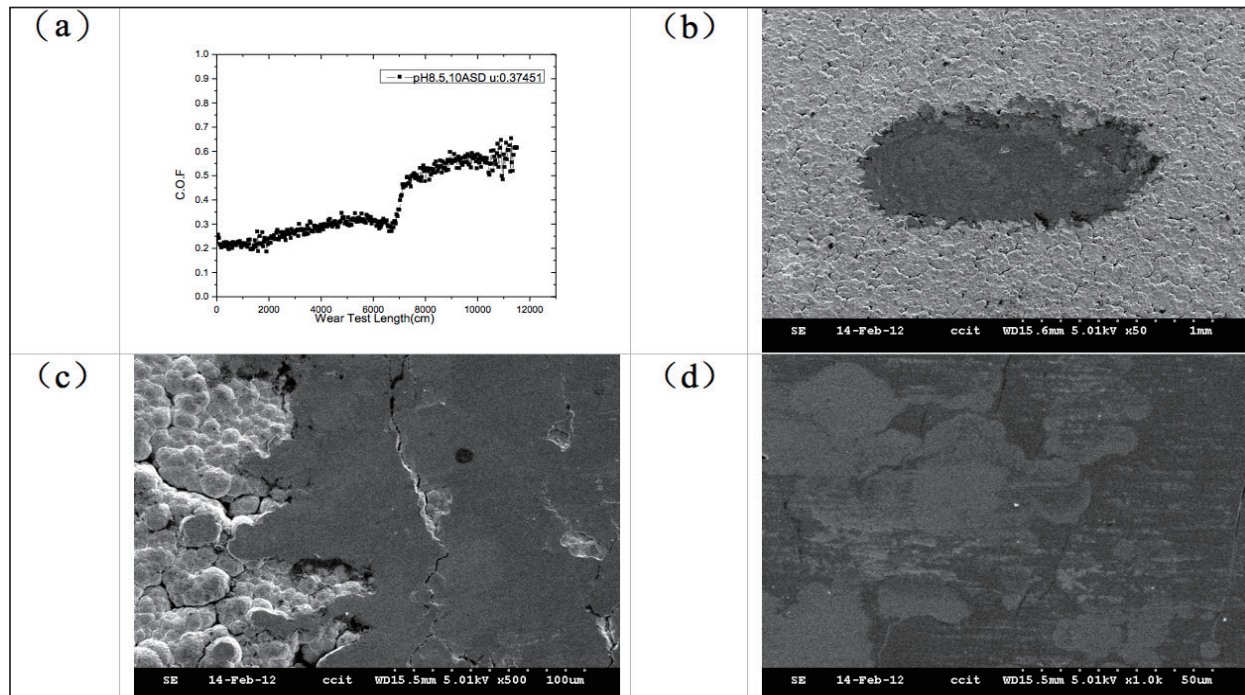
Ni-Mo試件		鍍層中 Mo含量 (wt%)	表面粗糙度 (μm)	鍍層硬度 (HV)	平均磨耗重量 損失 (mg/m)	平均摩擦係數 (μ)
ASD	pH值					
7.5	2	11.00	0 (破裂)	180	8.4×10^{-3}	0.309
7.5	5	10.27	1.457	711	2.3×10^{-3}	0.405
7.5	10	8.05	1.251	812	3.4×10^{-3}	0.347
8.5	2	1.91	0 (破裂)	220	4.3×10^{-3}	0.245
8.5	5	7.87	1.516	580	7.6×10^{-3}	0.362
8.5	10	6.58	1.945	490	2.8×10^{-3}	0.375
9.5	2	8.91	1.197	592	8.9×10^{-3}	0.526
9.5	5	7.42	2.847	617	3.9×10^{-3}	0.272
9.5	10	6.06	3.443	505	4.7×10^{-3}	0.227

資料來源：本研究整理



圖十六 鎳鉬主鹽比20:1、pH值7.5及10ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



圖十七 鎳鉬主鹽比20:1、pH值8.5及10ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

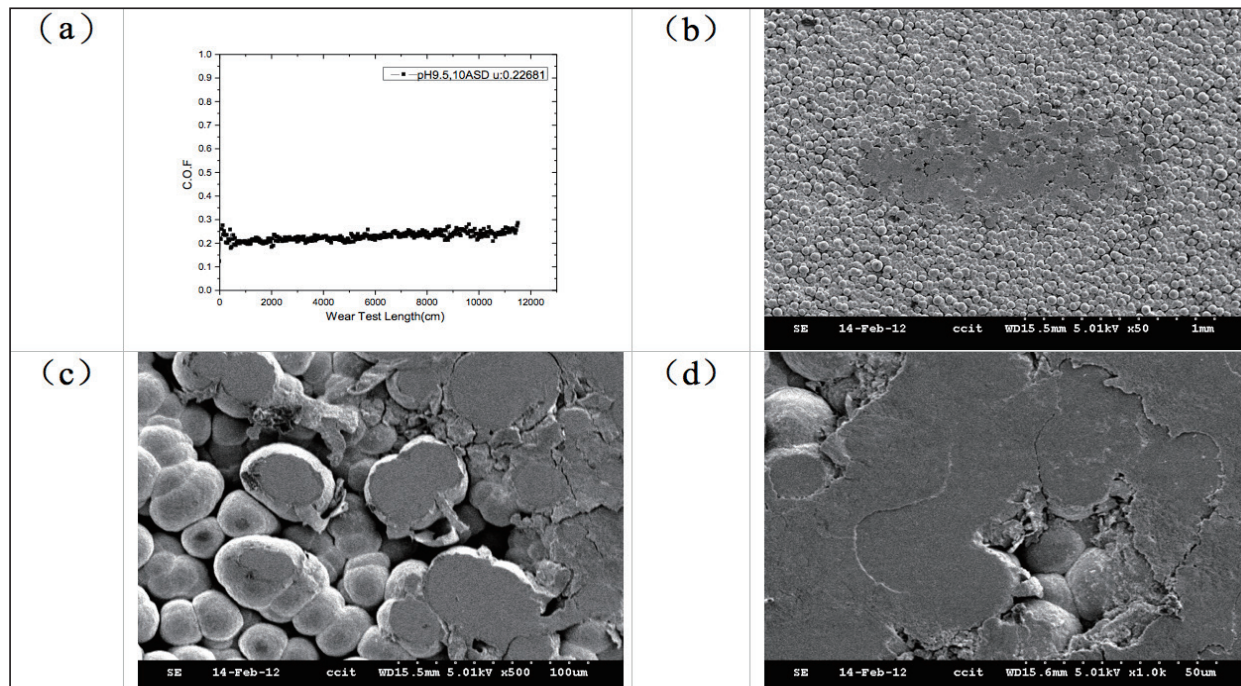
(資料來源：本研究繪製)

升趨勢，無黏著現象，可能是結節狀表面鍍層研磨後，鍍層逐漸轉移並填補於表面鍍層縫隙產生新的表面，導致其摩擦係數改變。圖十八顯示，雖然結節狀表面粗糙度大，但是與對磨球接觸面積變小，且其耐磨性表現佳導致摩擦係數低，與平均磨耗重量損失相符，從表面形貌觀察到結節狀表面縫隙尚未被完全填滿。圖十九顯示，摩擦係數曲線圖有些微上升趨勢，並由結節狀表面縫隙逐漸被填滿，待摩擦行程增加可能導致摩擦係數明顯上升。

表九顯示氧化鉛球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比30:1鍍層乾摩擦實驗數據於常溫下測試的摩擦係數，Ni-Mo鍍層試件在甫鍍態之

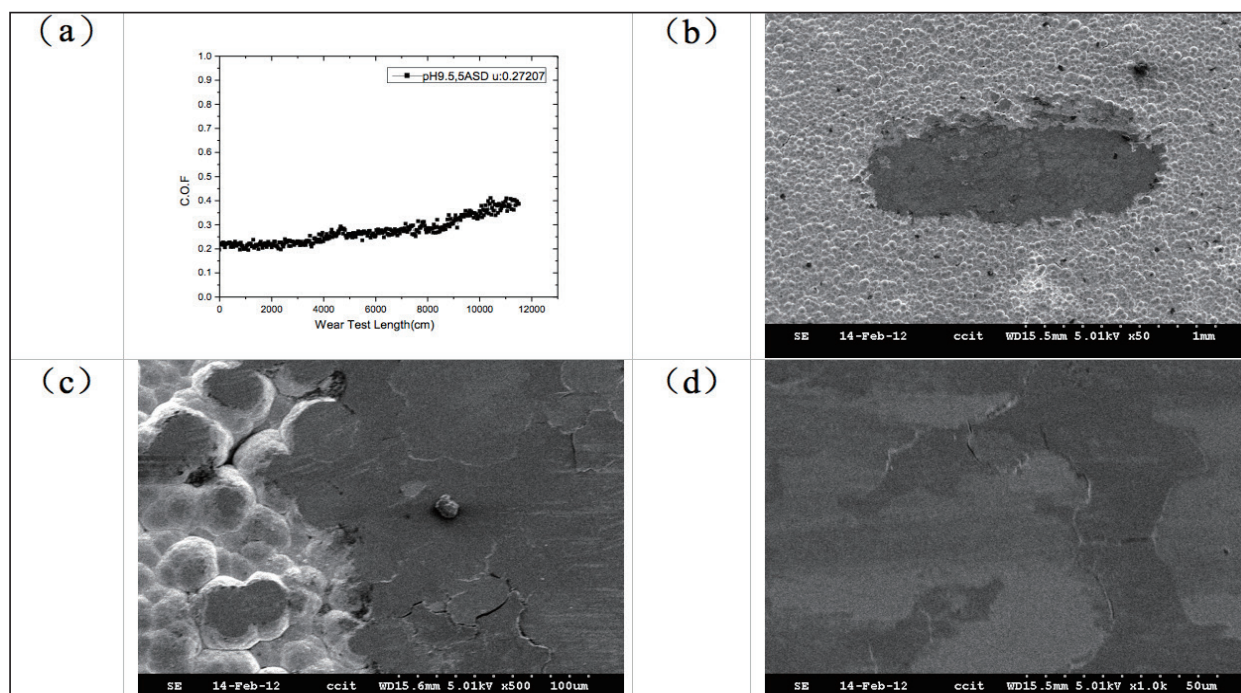
平均表面粗糙度範圍為 $0.885\sim 2.661\mu\text{m}$ 、平均硬度範圍為 $539\sim 711\text{HV}$ 、平均摩擦係數範圍為 $0.229\sim 0.532$ ，平均磨耗重量損失範圍為 $2.4\sim 16.2\times 10^{-3}\text{mg/m}$ 。

圖二十顯示，摩擦係數曲線圖相當平穩，無黏著現象產生，但表面形貌結節狀表現十分明顯，若摩擦行程持續增加（超過115.2m），可能導致摩擦係數明顯上升，另由圖十一顯示鍍層與基材剝離，可能造就大範圍的剝落。圖廿一顯示，摩擦係數曲線圖大約在20m處即有大幅上升趨勢，雖無黏著現象，結節狀表面亦小，但可能是由於結節狀表面鍍層耐磨性較差，且研磨後，鍍層逐漸轉移並填補於表面鍍層縫隙產生新的表面，



圖十八 鎳鉬主鹽比20:1、pH值9.5及10ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



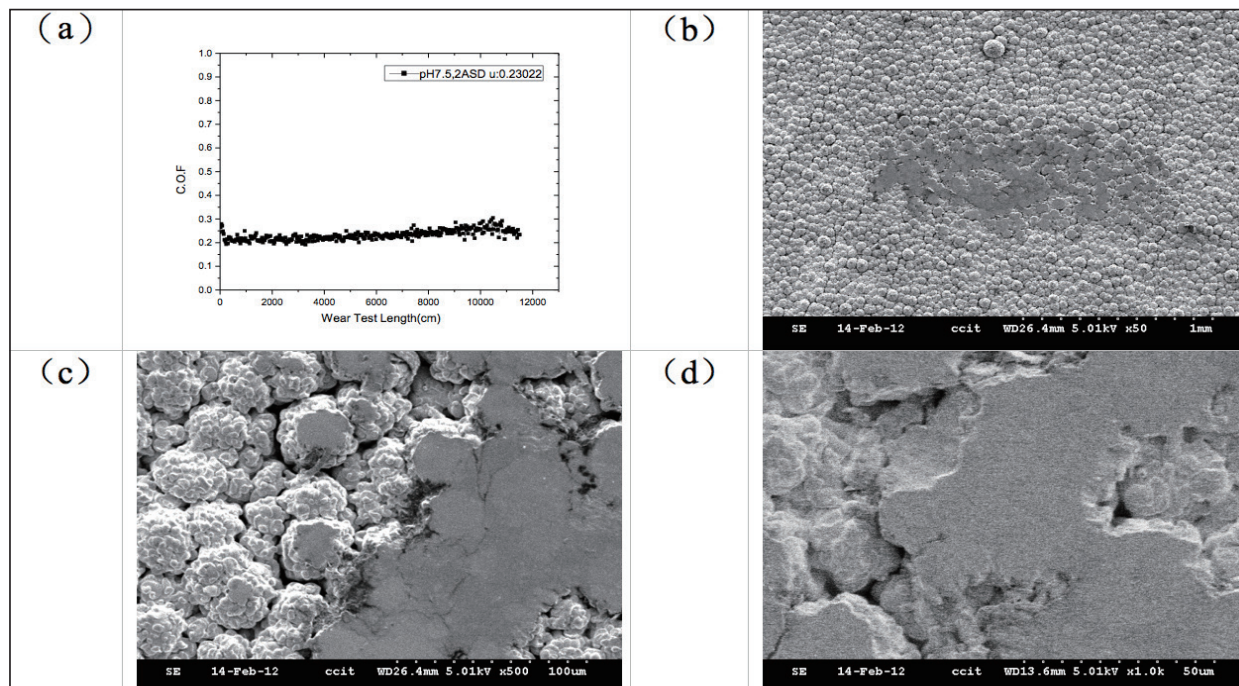
圖十九 鎳鉬主鹽比20:1、pH值9.5及5ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)

表九 氧化鋁球對甫鍍態之鎳鉬主鹽比30:1鍍層乾摩擦實驗數據

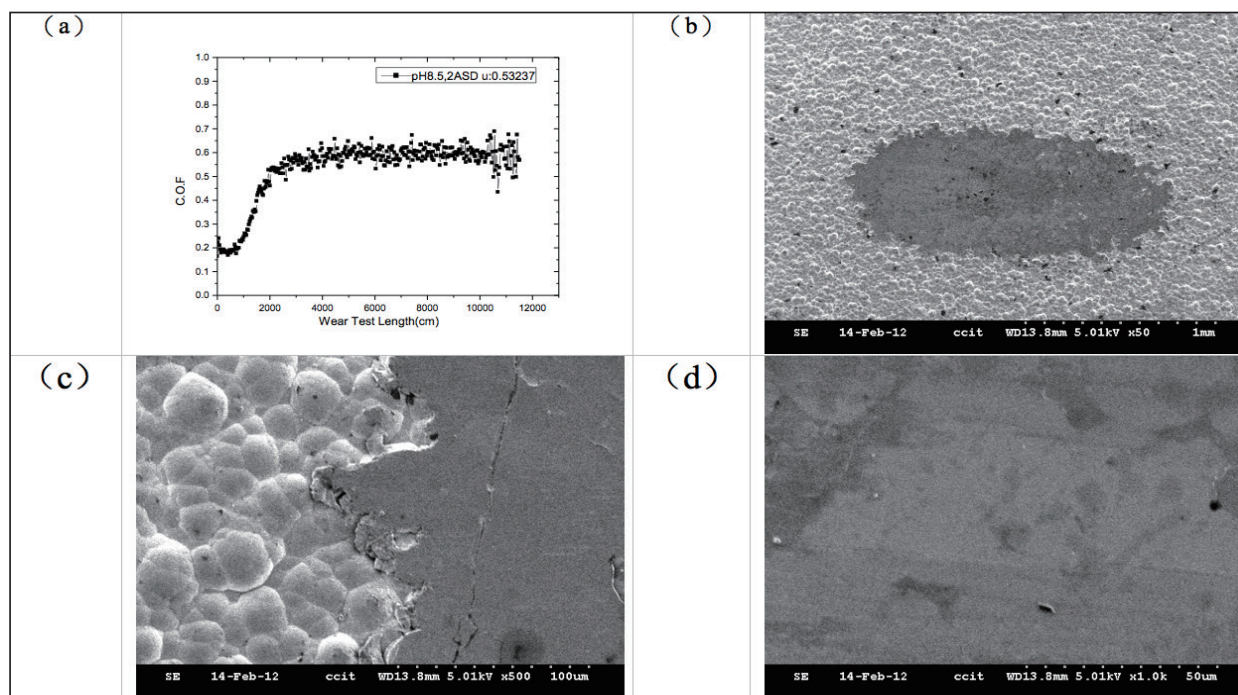
Ni-Mo試件 (ASD)	鍍層中 Mo含量 (wt%)	表面粗糙度 (μm)	鍍層硬度 (HV)	平均磨耗重量 損失 (mg/m)	平均摩擦係數 (μ)
pH值					
2	13.13	2.236	623	3.5×10^{-3}	0.230
7.5	12.00	1.537	711	16.2×10^{-3}	0.366
7.5	10.39	1.234	573	3.8×10^{-3}	0.480
10	12.05	1.725	583	10.7×10^{-3}	0.532
8.5	10.44	2.850	655	13.8×10^{-3}	0.229
8.5	8.00	1.105	539	3.5×10^{-3}	0.391
2	11.56	0.885	618	2.4×10^{-3}	0.358
5	8.31	1.089	627	4.8×10^{-3}	0.422
10	6.66	2.661	579	5.9×10^{-3}	0.311

資料來源：本研究整理



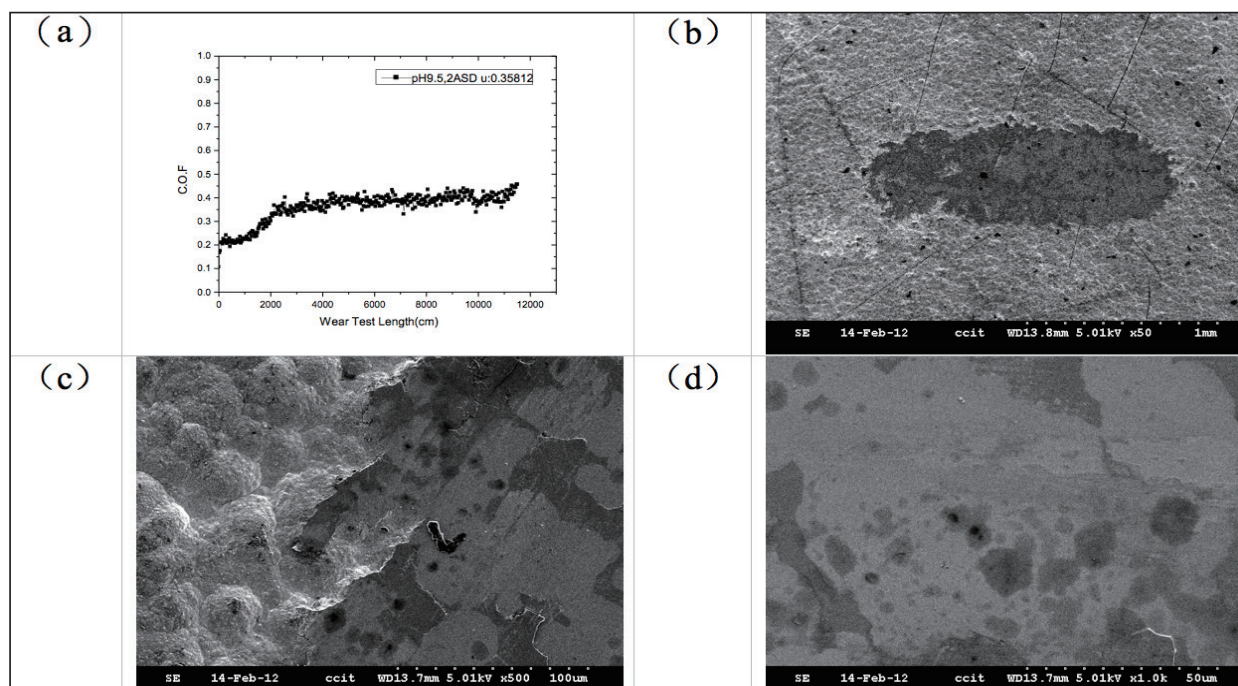
圖二十 鎳鉬主鹽比30:1、pH值7.5及2ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



圖廿一 鎳鉬主鹽比30:1、pH值8.5及2ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)



圖廿二 鎳鉬主鹽比30:1、pH值9.5及2ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)

因此對磨球與鍍層接觸面積變大，使得摩擦係數大幅上升。圖廿二顯示，結節狀表面較小，摩擦係數曲線圖僅些微上升趨向平穩，表明耐磨性佳，由SEM看出磨痕表面完整，與平均磨耗重量損失相符。圖廿三顯示，摩擦係數曲線圖大約在20m處即有大幅上升趨勢，有黏著現象及犁割現象產生，摩擦面有窪坑及材料的剝離。

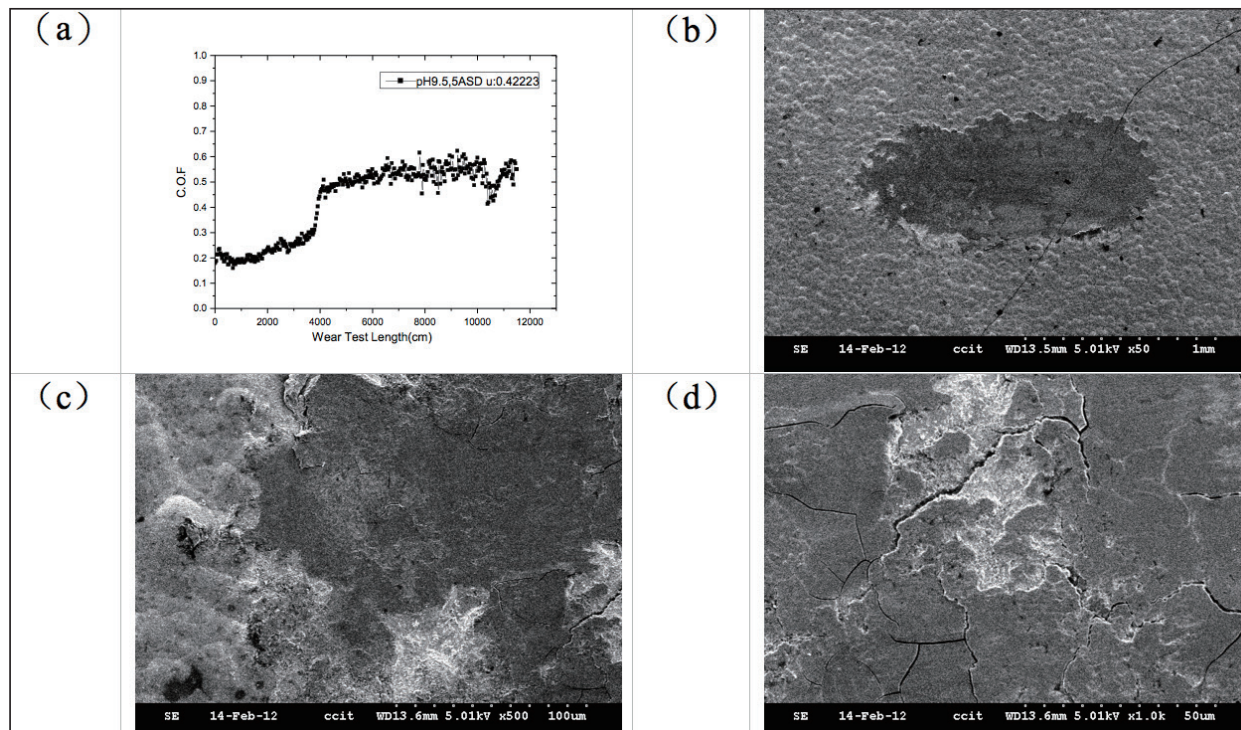
圖廿四顯示，為直流電鍍純鎳摩擦係數曲線與磨耗型態，其表面粗糙度 $0.554\mu\text{m}$ 、硬度為250HV、平均摩擦係數為0.418、平均磨耗重量損失為 $12.1\times 10^{-3}\text{mg/m}$ ，其摩擦係數曲線圖相當平穩，有黏著磨耗、刮痕磨

耗及疲勞磨耗產生，與平均磨耗重量損失相符。

伍、結論

本文利用三因子三水準全因子實驗設計規劃，探討直流電鍍時，不同鎳鉬主鹽比、電流密度及pH值對於合金鍍層變化影響分析研究，其結果如下：

表面形貌分析，各鎳鉬主鹽比均在2ASD、pH值9.5條件下，其鍍層表面形貌較為平整，有隨pH值增加，其島狀與結節狀增加。鍍層硬度分析，各鎳鉬主鹽比均在高電流密



圖廿三 鎳鉬主鹽比30:1、pH值9.5及5ASD，摩擦係數曲線與磨耗型態

(資料來源：本研究繪製)

度較高；其中以鎳鉬主鹽比30：1鍍層硬度最高。

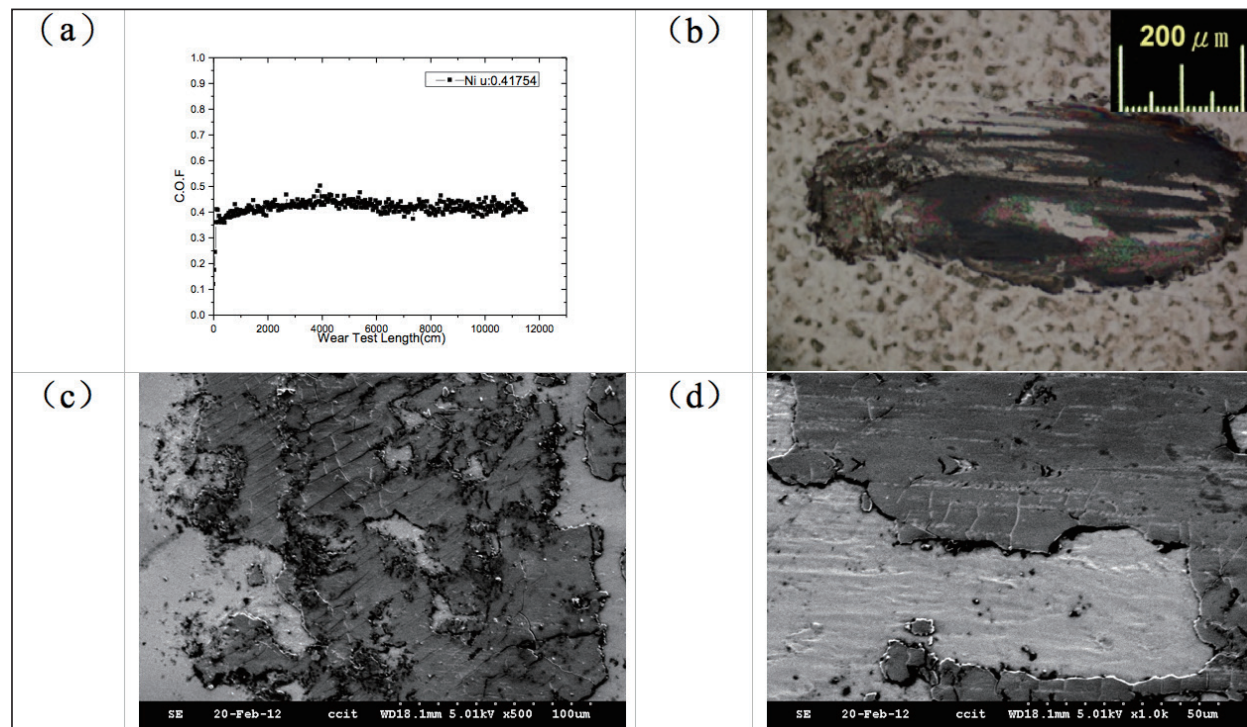
鍍層粗糙度分析，鎳鉬主鹽比為10：1時，pH值影響粗糙度最為顯著，呈現正相關；鎳鉬主鹽比為20：1時，pH值線性效應及電流密度線性效應與二次效應對鍍層粗糙度影響最為顯著，均呈現正相關；鎳鉬主鹽比為30：1時，5ASD時，其粗糙度均較高；其中以鎳鉬主鹽比10：1粗糙度最小。

鍍層增重（鍍層膜厚）分析，鎳鉬主鹽比為10：1時，pH值線性效應及電流密度線性效應與二次效應對其影響最為顯著，均呈現正相關；鎳鉬主鹽比為20：1時，pH值影響最

為顯著，呈現正相關；鎳鉬主鹽比為30：1時，有隨著pH值增加而增加的趨勢，且隨著電流密度增加而減少的趨勢；其中以鎳鉬主鹽比30：1鍍層增重最多。

鍍層Mo含量分析，鎳鉬主鹽比為10：1時，pH值及電流密度對鍍層Mo含量影響最為顯著，均呈負相關；鎳鉬主鹽比為20：1與30：1，電流密度對鍍層影響為負相關；其中以鎳鉬主鹽比10：1 Mo含量最高。

鍍層磨耗分析由表七至表九中，在低pH值較容易產生黏著及犁割現象，在高電流密度較容易產生結節狀的表面，起始摩擦係數較低，可能是由於對磨球與試件接觸面積較



圖廿四 純鎳，摩擦係數曲線與磨耗型態

（資料來源：本研究繪製）

表十 直流電鍍Ni-Mo與電鍍純鎳實驗數據比較表

條件	硬度 (HV)	粗糙度 (μm)	增重 (g)	平均磨耗重量 損失 (mg/m)	平均摩擦係數 (μ)
直流電鍍Ni-Mo	618	0.885	1.304	2.4×10^{-3}	0.358
電鍍純鎳	250	0.554	2.432	12.1×10^{-3}	0.418

資料來源：本研究整理

小所致；當結節狀表面鍍層研磨後，鍍層逐漸轉移並填補於表面鍍層縫隙產生新的表面，因此對磨球與鍍層接觸面積變大，摩擦係數將大幅上升，但其相對重量損失亦不完全，須考慮磨耗類型，若黏著磨耗產生，其磨耗損失相對上升；若無黏著磨耗產生，其磨耗損失不大，部分Ni-Mo合金重量磨耗大於純鎳，可能由於製程參數影響鍍層機械性質甚大，並非硬度高其磨耗一定較少，必須考量鍍層附著性及磨耗類型。

本研究以最佳參數鎳鉬主鹽比為30:1、pH值9.5及電流密度2ASD直流電鍍Ni-Mo為條件與電鍍純鎳做比較。如表十所示，直流電鍍鎳鉬合金在硬度、平均磨耗重量損失及平均摩擦係數表現，均比純鎳較為優，磨耗可大幅降低約80%。

國軍在保修層級區分三段五級，技術均已成熟，然因關鍵性料件短缺、採購時間過於冗長、料件單價高及消失性商源等因素，致無法適時恢復裝備妥善，進而無法滿足作戰需求，如前言中所提國軍飛彈系統搜索雷達傳動軸（單價1,016美元）因磨耗導致天線無

法旋轉，無法搜索目標，我軍將失去防空作戰能力；而飛彈發射架空壓機（單價21,669美元），因汽缸磨耗導致其無法提供3,000PSI壓力給紅外線系統冷卻及飛彈尋標器冷卻，此時無法搜索目標及飛彈無法射擊，我軍將失去中低空防禦能力；傳動軸及空壓機汽缸均可藉由電鍍再生及表面材質強化，減少摩擦、磨耗產生之故障，延長裝備使用期限，進而節省大量公帑支出。甚至國軍武器裝備凡因摩擦、磨耗導致無法使用之元件或關鍵性、無商源之元件上，均可藉由表面工程技術進行故障品修護或新、勘品易磨耗部位改良。

作者簡介

蔡春泉少校，中正理工學院車輛系90年班、國防大學理工學院兵研所101年班，現任職後勤訓練中心彈藥組教官。