

# 常壓電漿快速滲氮對冷作模具鋼抗衝擊耐磨性能之研究

## Study of the enhanced impact and wear resistance of cold work die steel using atmospheric pressure plasma rapid nitriding process

蔡明駿<sup>1\*</sup>、鍾宛庭<sup>1</sup>、郭兆渝<sup>1</sup>、郭俞麟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣科技大學 機械工程系

<sup>2</sup> 國立臺灣科技大學 自動化控制中心

\*E-mail: m11003507ntust@gmail.com

### 摘要

JIS SKD11，亦稱作冷作模具鋼，其應用十分廣泛，舉凡藥模、造幣模具、深抽成型模具及工業用刀等產業，然而在使用過程中易發生金屬疲勞破裂或磨耗等問題使模具使用壽命降低，亦為本研究討論之主旨，本實驗因而利用常壓電漿噴射束(Atmospheric pressure plasma jet, APPJ)對模具鋼表面進行滲氮之處理，以提升模具鋼之機械性質及其使用壽命。與傳統氮化製程相比，本研究無須在真空系統、毒性氣體的環境與長時間之製程時間下完成滲氮，本研究亦可在常壓環境下、製程時間比較短、能源消耗低等優勢情況下來達成冷作模具鋼之表面處理。

透過 APPJ 對麻田散鐵基之 JIS SKD11 進行不同功率下的快速氮化處理，探討於對於模具鋼之壽命影響。使用維氏硬度機(HV)測量表面硬度、光學顯微鏡(OM)觀察金相組織及 X 光繞射儀(XRD)確認氮化結果、往復式磨耗及衝擊磨耗來判定模具使用之情況及失效之分析，以探討不同功率下的電漿氮化與原始材料之差異。本研究之工作氣體通入 2% $H_2/N_2$  之混合性氣體進入常壓電漿系統內部激發電漿，結果顯示功率設定 500 W，其表面硬度可提升至 1200HV<sub>0.05</sub> 以上，其氮化層厚度約 66 $\mu m$ ，而於 600 W 之功率下表面硬度有顯著的下降，推測電漿溫度過高及離子過度轟擊所導致；透過往復式磨耗來模擬模具使用時的摩擦行為及衝擊磨耗來模擬沖壓行為，發現試片經過 APPJ 處理後，磨痕寬度及坑洞(crater)體積都有下降的趨勢。因此，在研究中發現常壓電漿氮化提供一項短時間的綠色製程，對於未來模具鋼的表面處理提供一項新的技術。

**關鍵詞：**冷作模具鋼、常壓電漿噴射束、快速氮化、磨耗試驗、耐衝擊試驗

### Abstract

JIS SKD11, also known as cold working die steel, is widely used in medicine mold、coinage mold、deep drawing molding mold、turning tools, and other industries. However, metal fatigue or wear fracture often occurs in the process, reducing the mold's service life. This study uses atmospheric pressure plasma jet (APPJ) nitriding the die steels surface to improve the mechanical properties and service life. Compared with the traditional nitriding process, the APPJ system doesn't need a vacuum system、toxic gas, and a long process time. This study can also achieve the surface treatment of cold working die steel under atmospheric pressure、short process time, and low energy consumption.

Investigated the effect of rapid nitridation treatment on the service life of JIS SKD11 by different APPJ power. Use Vickers hardness tester (HV) to measure surface hardness、optical microscope (OM) to observe the metallographic structure, and X-ray diffractometer (XRD) to confirm nitriding results. Ball-on-Flat Sliding Wear test and impact wear test to determine the failure of the mold, to analyze

the difference between APPJ nitriding and pristine materials. The working gas of this study is 2% $H_2/N_2$  hybrid gases. The result shows that the power setting is 500 W, the surface hardness can be increased to more than 1200 HV0.05, and the nitride layer thickness is about 66  $\mu m$ . Because the plasma temperature is too high and the ionic bombardment, the surface hardness decreased significantly at the power of 600 W, and the Ball-on-Flat Sliding Wear test is used to simulate the mold's friction behavior and impact wear to simulate the stamping behavior. Therefore, atmospheric pressure plasma nitriding provides a short-term green process and new technology for the surface treatment of mold steel in the future.

**Keywords :** Cold work die steel、Atmospheric pressure plasma jet、Rapid nitriding、Wear test、Impact wear test

## 1. 前言

本研究為針對 JIS SKD11 冷作模具鋼利用常壓電漿噴射束(Atmospheric pressure plasma jet, APPJ)系統對模具鋼進行快速表面改質，改良模具鋼在應用上的耐磨耗與耐衝擊能力，藉以提升模具之使用年限。因模具鋼在使用過程中需承受重複連續應力，模具鋼之表面改質就變得極其重要，SKD11常因表面硬度不足造成模具疲勞磨損及破壞，因此常會使用金屬表面硬化法，在金屬內部還保有其韌性的情形下，通過製程在表面形成耐磨耗之高硬度層，提升模具鋼機械性質，本研究為對氮化法進行探討，傳統的氮化法有氣體氮化(Gas nitriding)、鹽浴氮化(Salt-bath nitriding)及離子氮化(Ion nitriding)三種，其製程時間都是以小時為單位計算，而使用常壓電漿氮化與傳統氮化製程相比，具有以下特點：因其能量集中具有製程時間短的特性、在大氣環境下製程因此無須真空設備以及工作氣體無毒性，因此在講求永續投資(Environmental、Social、Governance, ESG)的現代產業常壓電漿氮化為一項創新之綠色製程。本研究將會針對不同常壓電漿氮化之功率對於JIS SKD11冷作模具鋼氮化效果進行探討，並設計一系列的實驗模擬冷作模具使用情形，研究模具經氮化處理前後性質之差異。

## 2. 實驗方法與步驟

本研究之實驗流程圖如圖1所示，先將原始材料進行熱處理及切割再經研磨拋光後進行電漿氮化處理，再將經處理後之試片，並進行各種研究分析。

### 2.1 熱處理與前處理製程

本研究向萬代鋼鐵五金企業有限公司購買厚度6 mm的JIS SKD11冷作模具鋼板，再由雨暉熱處理股份有限公司進行淬火與550°C回火調質處理，其硬度約落在550至600 HV<sub>0.3</sub>，再將熱處理後之鋼板由線切割成15 mm × 15 mm × 6 mm之方形試片，切割完成的試片表面使用100號水砂紙依序研磨至2500號，接著使用1  $\mu m$ 及0.3  $\mu m$ 之氧化鋁粉拋光液，依序將試片拋光處理至鏡面後，並使用丙酮與酒精進行超音波震盪清洗各15分鐘，再放入50°C烘箱烘乾試片之水氣，以上程序即完成試片之前處理。

### 2.2 常壓電漿氮化處理

氮化之製程設備使用淞耀公司(Click Sun-Shine Corp.)生產之常壓電漿噴射束(Atmospheric Pressure Plasma Jet, APPJ)系統進行，設備如圖2所示，工作氣體為使用純度95%之氮氣且氣體壓力設定為2.55 kg/cm<sup>2</sup>，當電漿點燃後再混入氫氣以保證操作之安全性，而此時氮氣與氫氣混和之比例為2%，待電漿穩定後，以試片表面距離噴嘴3 mm之距離進行氮化處理，持續時間10分鐘，處理完成後使用氮氣氣淬7分鐘使試片降溫至100°C以下，此動作之目的是防止試片氧化，處理及冷卻製程進行時以溫度感測器搭配熱電偶進行溫度變化之紀錄，以觀察溫度變

化對於氮化製程的影響，詳細實驗參數如表1所示。

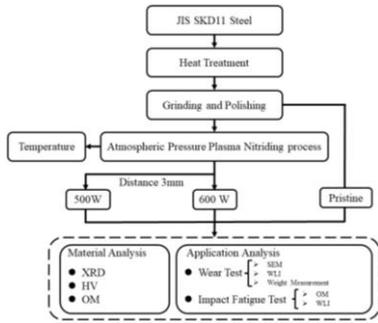


圖1 實驗流程圖

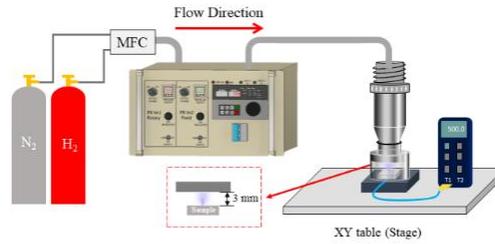


圖2 常壓電漿氮化設備圖

表1 實驗參數

Experimental details	
Working gas	2% H <sub>2</sub> -N <sub>2</sub>
Gas Pressure	2.55 kg/cm <sup>2</sup>
Treatment Time	10 min
Power	500 W · 600 W
Distance	3 mm

### 2.3 X光繞射結構分析

本研究使用台科貴儀中心 D2 Phaser XE-T 粉末X光繞射儀，其靶材為銅靶，偵測器為 Lynxeye XE-T 維線偵測器，此偵測器能量解析高，針對樣品中含有高濃度鐵、鈷、鎳等磁性材料能發揮有效之螢光壓抑效果，並可獲較佳之訊噪比[1]。本次實驗設定參數為掃描角度2θ為20°~90°、每0.02度取一點、每點停留時間為1秒，再將獲得之圖譜使用粉末繞射標準聯合委員會(JCPDS)所發行的粉末繞射資料檔進行結構分析並與原材比對確認氮化效果。

### 2.4 金相組織分析

光學顯微鏡(Optical Microscope, OM)使用型號為Zeiss Axio Lab A1之設備，本機台配載10倍、20倍、50倍之物鏡。將實驗試片剖切經鑲埋、研磨及拋光後，使用5 wt%硝酸腐蝕液腐蝕，最後使用OM拍攝並搭配目鏡總倍率為500倍之金相，分析研究試片氮化層深度與組織變化。

### 2.5 維克氏硬度分析

本實驗使用維克氏硬度試驗(Vickers hardness test, HV)進行機械性質分析，量測機台為 Akashi MVK-H1 微小維克氏硬度測試儀。硬度分析主要可分為兩個部分，首先為表面硬度測試，對試片表面每隔0.5 mm測試一個點，並繪製表面硬度變化曲線圖；接著為剖面硬度，將試片剖切後經鑲埋後，再研磨及拋光，從試片表面往心部進行分析，以研究氮化組織硬化深度。

### 2.6 往復式磨耗分析

為模擬模具在使用時的磨耗行為，本研究採用ASTM-G133標準[2]的往復式磨耗試驗機，本機台具直線往復移動機構，且搭配砝碼調整實驗荷重，且使用計數器紀錄磨耗機往復次數即可固定試驗距離，如圖3所示，本實驗荷重使用5 N、磨耗距離為300 m，並使用鎢鋼球做為磨頭，測試前後使用精密天平量測重量，比較磨耗前後的重量損失，再以白光干涉儀(White Light Interferometry, WLI)量測磨痕深度，最後使用場發式掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)拍攝磨痕邊緣與中間的磨損情況進行分析。

### 2.7 衝擊磨耗分析

一般的磨耗測試例如：銷對盤磨耗測試(Pin-on-Disk Tribometer)、砂輪測試(abrasive wheel test)等測試方法無法評估重複動態負載所引起的磨損行為[3]。因此為模擬模具使用時的沖壓情形，使用衝擊磨耗測試能呈現實際應用之狀況。本研究使用之設備如圖4所示，參數設定施加荷重為1 N、頻率為20 Hz的，使用鎢鋼球施加40萬次的衝擊，實驗完成後使用OM觀察凹痕形貌並使用WLI量測凹痕深度與寬度。

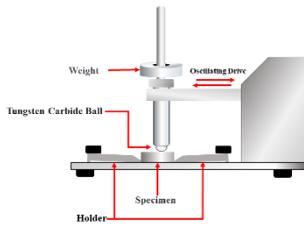


圖3 往復式磨耗機設備示意圖

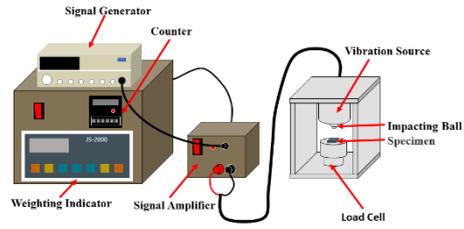


圖4 衝擊磨耗機設備示意圖

### 3. 結果與討論

#### 3.1 X光繞射結構分析

將常壓電漿氮化處理之試片與原始材料利用 XRD 取得繞射圖譜，再比對 JCPDS 的 PDF 資料庫系統進行結構分析與比對。圖 5(a)為原材之繞射數據，結果呈現為鐵基材料，因此繞射平面分別為(110)、(200)、(211)之鐵(Fe)訊號，以及鉻碳化物( $Cr_7C_3$ )之繞射峰。圖 5(b)是常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片，出現  $30.12^\circ$ 、 $38.54^\circ$ 、 $41.57^\circ$ 、 $43.96^\circ$ 、 $57.81^\circ$ 、 $69.72^\circ$ 、 $77.24^\circ$ 、 $84.43^\circ$  與  $86.20^\circ$  之峰值表示為  $\epsilon$ - $Fe_{2-3}N$  之繞射峰， $47.97^\circ$ 、 $70.18^\circ$  出現  $\gamma'$ - $Fe_4N$  之繞射峰，最後於  $37.60^\circ$ 、 $63.50^\circ$  則是屬於氮化鉻之繞射峰，以此發現繞射峰皆為氮化物，因此可證明本常壓電漿製程具有氮化效果。圖 5(c) 是常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片，鐵(Fe)基訊號再次顯現，此情況推斷為因功率為 600 W 時，電漿溫度較高使表面氮化物有團聚的現象，又因高能量電漿使離子轟擊情形加劇，所以當 X 光入射時氮化訊號降低，原材訊號增強，因此在  $39.46^\circ$ 、 $44.22^\circ$  也有鉻碳化物之訊號，但在  $38.09^\circ$ 、 $41.89^\circ$ 、 $63.84^\circ$  有  $\epsilon$ - $Fe_{2-3}N$  繞射峰證明 600 W 也是有氮化效果的出現。

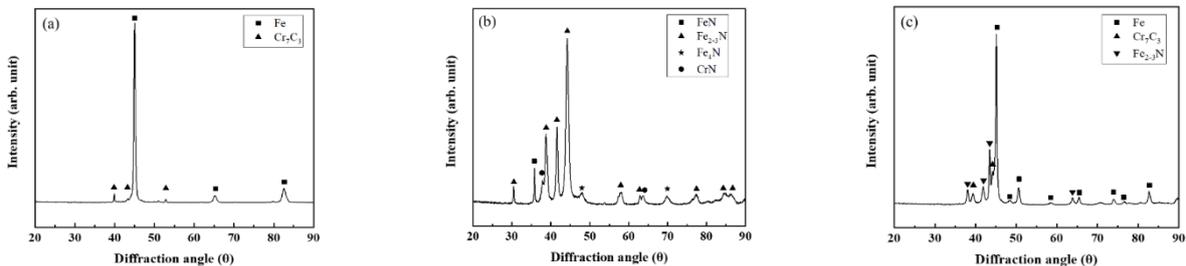


圖 5 (a)原始材料、(b)500 W 與(c)600 W 常壓電漿氮化處理之試片 XRD 圖譜

#### 3.2 金相組織分析

典型的氮化組織主要由最外層的化合物層、過渡的擴散層及原材的心部組織三個區域組成，氮含量由最外側向內遞減。圖6為原材與經不同瓦數處理之常壓電漿氮化之金相組織圖，圖6(a)至圖(c)分別為原始材料、經常壓電漿氮化之500 W與600 W處理。圖6(a)為原材剖面之金相組織，發現經過前處理之真空調質製程產生的高溫回火麻田散體與細小的合金碳化物，此組織也可和XRD圖譜相呼應；由常壓電漿氮化之500 W之製程處理之組織如圖6(b)所示，其呈現於試片表層顯現一層白色之化合物層，厚度約為 $9.6\ \mu m$ ，在化合物層下方顏色較深處為擴散層組織，厚度約為 $58.2\ \mu m$ ，因此整體氮化層厚度約為 $66\ \mu m$ ；圖6(c)常壓電漿氮化之600 W之製程處理之試片，其表面並沒有化合物層出現，其擴散層厚度約為 $108.1\ \mu m$ ，無白層出現。

當電漿功率提升，氮化製程溫度也會提升，常壓電漿氮化製程處理溫度變化如圖7所示，500W製程溫度約為 $409^\circ C$ ，而600 W製程溫度約為 $532^\circ C$ ，因此從顯微組織中可以觀察到當處理電漿瓦數越高，其整體氮化層厚度也越深。

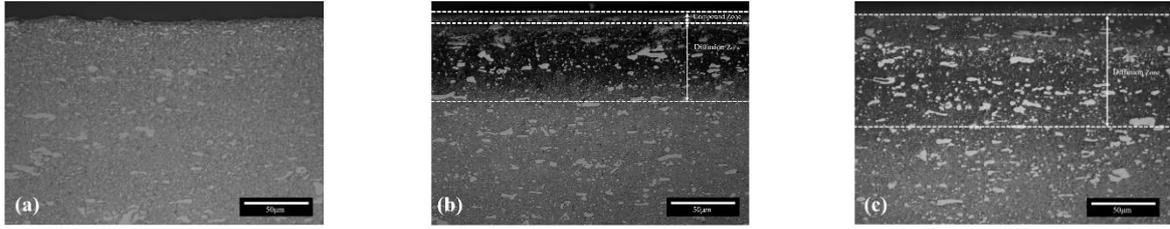


圖6 不同處理製成金相組織(a)原材、(b) 500 W常壓電漿氮化、(c) 600 W常壓電漿氮化

### 3.3 硬度分析

利用維克氏硬度機以50克的荷重進行表面硬度量測，原材平均硬度大約為657 HV<sub>0.05</sub>左右，再分別量測常壓電漿氮化試片之表面硬度趨勢，其趨勢如圖8所示，由圖中可以發現常壓電漿氮化試片表面硬度趨勢在中心處都有下降之趨勢，600 W試片尤其明顯，中心硬度甚至降至與原材接近，其原因為在常壓電漿噴射束製程中因其能量集中的特性，因此在中央離子轟擊強度較強，導致試片表面產生孔洞造成硬度下降，而600 W因其能量更高，離子轟擊效果更強烈且範圍更廣，由此原因使其最高硬度也低於500 W之試片。

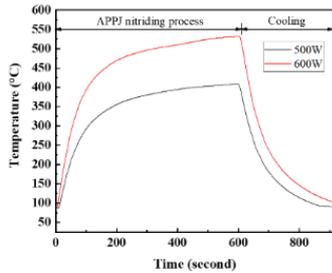


圖7 基板溫度變化圖

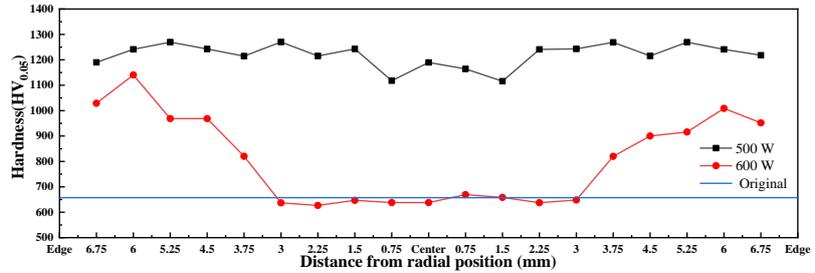


圖8 原材表面平均硬度與經處理試片表面硬度趨勢比較圖

利用維克氏硬度機以50克荷重從試片表面往內部量測剖面硬度，結果如圖9所示，圖9(a)為常壓電漿氮化經500 W處理之試片，可與圖6(b)同時觀察，當氮化層深度越厚，其氮含量隨著從表面開始至心部逐漸降低，而硬度值也有逐漸下降的趨勢，由金相組織呈現出氮化層厚度約66 μm，而硬度大約從50 μm附近開始接近心部硬度，說明其數據與OM之結果相吻合。常壓電漿氮化經600 W處理之試片其接近表面處之硬度明顯較低，其原因推測為600 W之氮化溫度較高，因此氮原子向材料內部擴散，使試片表面無法形成高氮含量之化合物層，因電漿功率過高，在高能量的離子連續轟擊下所導致其表面附近生成許多孔洞，從而使硬度降低，但從表面距離往心部50 μm開始有硬度上升趨勢，因此可證明氮原子還是會繼續藉由電漿之轟擊擴散進入鋼材內部，使該深度下有滲氮硬化的效果，與圖6(c)顯微組織比較，其氮化層厚度約108.1 μm，而硬度則是在100 μm開始接近心部硬度。



圖9常壓電漿氮化處理試片剖面硬度趨勢 (a)電漿功率為500 W、(b)電漿功率為600W

### 3.4 往復式磨耗分析

將磨耗分析設備設定之參數為荷重 5 N、300 m 往復式磨耗試驗完成後。原材磨痕形貌如圖 10(a)所示，其磨痕最深處約為 0.27  $\mu\text{m}$ ，從三維圖片中可以發現試片經試驗機往復摩擦後，材料有往兩側堆積的情形發生，從二維形貌圖中可以很明顯的看出有磨痕輪廓呈現，代表此試片因表面硬度的不足而有磨損的現象發生。圖 10(b)為常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片其磨耗測試後之磨痕，從圖中可以發現磨痕深度約為 0.09  $\mu\text{m}$ ，與原材相比其耐磨性有明顯上升，從形貌圖中可以發現其依舊有材料堆積於兩側的情形發生，但模具在使用時，其摩擦物之間接觸面積較大，因此材料往兩側堆積之情形應較不劇烈，且將模具之壽命提升。最後圖 10(c)為常壓電漿氮化經 600 W 處理之試片，其磨痕深度約為 0.22  $\mu\text{m}$ ，從前面進行的剖面硬度測試可以發現 600 W 試片在 50  $\mu\text{m}$  深度前硬度與原材相近因此其耐磨耗效果上升較不顯著。

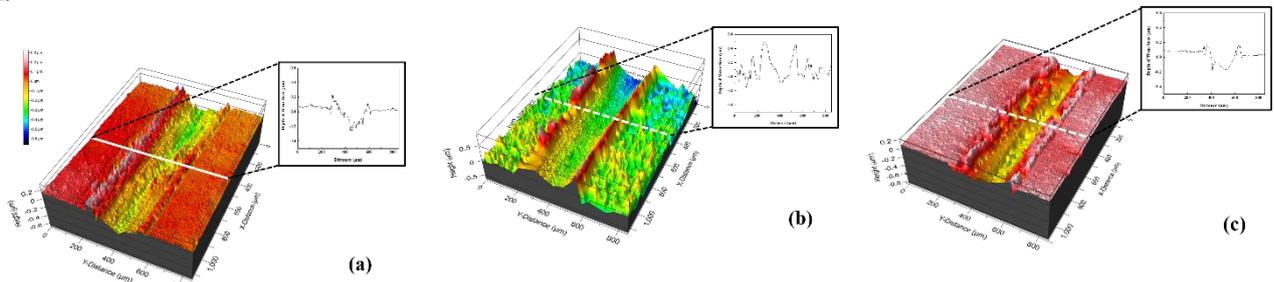


圖 10 原材與經氮化處理試片磨道三維與二維形貌

將試片以場發式掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)拍攝磨痕中央與兩側，觀察其裂紋及表面，如圖 11 所示，原材經磨耗後在磨道中央與兩側皆有裂紋顯現其為經往復式摩擦行為時，因剪切作用形成的疲勞磨耗[4]，在裂紋產生的同時從中發現有碎屑剝落、黏附與變形之情況[5-7]，此情形可視為剝層磨損(Delamination Wear)。可以發現常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片在磨耗後，試片中央具有明顯的直向刮痕，其形成原因為化合物層經磨耗斷裂後，形成硬質顆粒造成的磨粒磨耗[8]，但由於表面白層具有潤滑特性[7,9]，可以抑制動態負荷下所產生的摩擦效應，因此僅能在磨道兩側發現些許的剝離與裂紋情形。常壓電漿氮化經 600 W 處理之試片具有以上所述之磨耗行為，其磨道中央也有磨粒磨耗的行為發生，且兩側也具有大量的剝落與裂紋顯現。

最後將試片進行重量之量測，由表 2 中可以發現原材之重量損失最高、600 W 氮化處理試片次之，最後為 500 W 氮化處理之試片，此情形也可以與前述所分析的硬度與磨耗行為相互佐證。

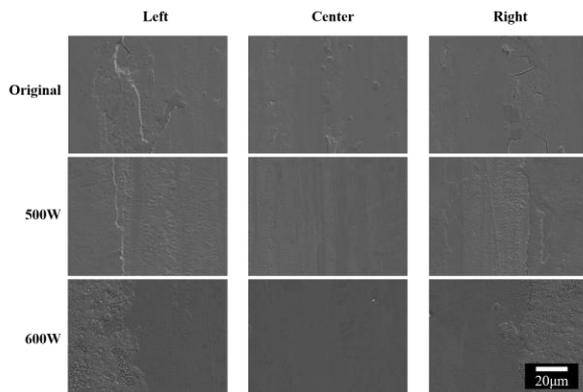


圖 11 經磨耗後原材與已處理試片磨道表面形貌

表 2 磨耗試驗後重量損失比較

	Original	500 W	600 W
Before (mg)	10667.2	10512.5	10485.8
After (mg)	10665.8	10511.9	10485.1
Weight Loss (mg)	1.4	0.6	0.7

### 3.5 衝擊磨耗分析

將原材試片於 1 N 下進行 40 萬次衝擊磨耗試驗其形貌如圖 12(a)所示，凹痕深度約為 7.64  $\mu\text{m}$ ，其顯微結構如圖 13(a)所示，其寬度約為 294  $\mu\text{m}$ 。圖 12(b)為常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片表面形貌，凹痕深度約為 3.54  $\mu\text{m}$ ，與原材相比，其更能承受垂直式的動態衝擊疲勞及磨損；圖 13(b)為其顯微結構，凹痕寬度約為 207  $\mu\text{m}$ ，再次佐證經改質試片比原材有更好的耐垂直衝擊性質。圖 12(c)與圖 13(c)為常壓電漿氮化經 600 W 處理之試片表面形貌與顯微結構，凹痕深度約為 3.92  $\mu\text{m}$ ，凹痕寬度約為 232  $\mu\text{m}$ ，其耐垂直衝擊性質約介於原材與常壓電漿氮化經 500 W 處理之試片之間，原因也與硬度與往復式磨耗相同，因表面離子轟擊之孔洞導致其耐衝擊性質較 500 W 之試片差。從以上結果可以得知，更高的硬度可以得到較佳的抗衝擊磨損能力[10]。

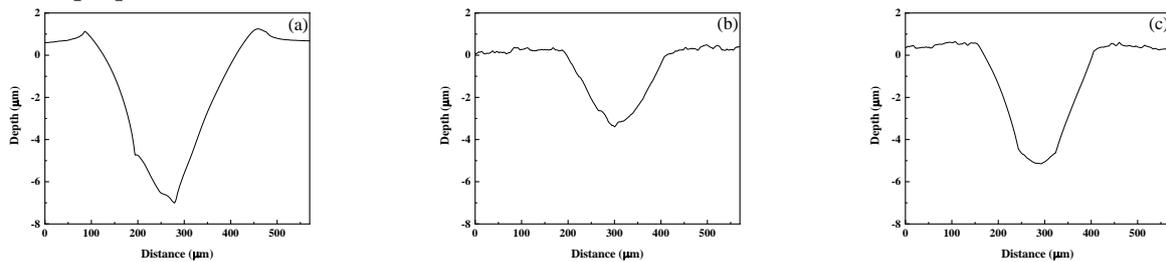


圖 12 原材與經氮化處理試片衝擊磨耗試驗形貌

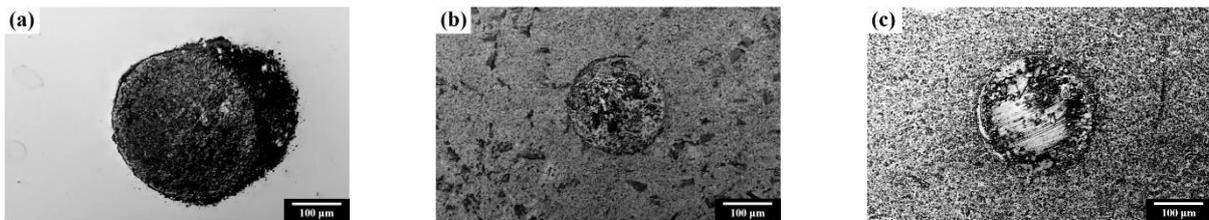


圖 13 原材與經氮化處理試片衝擊磨耗試驗顯微組織

## 4. 結論

- (1) 從 XRD、硬度與金相組織結果來看利用常壓電將進行十分鐘之氮化製程具有可行性，經處理試片呈現出具有氮化峰的繞射圖譜且硬度有顯著的提升，也可再使用金相組織的變化相互佐證氮化效果。
- (2) 分別經 500 W 與 600 W 常壓電漿氮化處理之試片，在硬度表現上 500 W 之試片會較 600 W 來的佳，其原因為 600 W 常壓電漿能量較高，導致其離子轟擊較為劇烈，因此試片表面產生大量孔洞使硬度數值下降，此情形在表面與剖面硬度都有顯示。
- (3) 從往復式磨耗試驗結果來看，SKD11 原材的磨耗深度最深且在磨道各處皆有裂紋產生，並有材料剝離的情形。在電漿氮化過後產生的  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  及  $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$  氮化物層，具有潤滑效果並減少磨損的發生，經 500 W 常壓電漿氮化處理後之試片磨道深度有明顯的下降，而 600 W 試片也因孔洞使磨損行為與原材類似。因此經常壓電漿快速氮化之試片在往復式的連續磨耗性質上有顯著之提升，在冷作模具實際使用上具有應用價值。
- (4) SKD11 原材試片經垂直動態衝擊磨耗試驗後，凹痕顯現較深的深度及寬度。但經氮化處理後其耐衝擊性質提高，使深度及寬度皆有下降，與硬度及往復式磨耗性質相呼應，當硬度上升，其耐磨耗性質也會有所提升，因此在評估模具鋼表面改質時可將硬度作為一項參考依據。
- (5) 利用常壓電漿噴射束進行氮化製程為一項快速且環保製程，本研究將與業界合作(執行中)，利用常壓電漿將產業使用模具進行氮化處理，如圖 14 所示，紅圈處為經常壓電漿

氮化部分，探討產線實際應用時的情形，但因有簽訂保密協定，詳細數據恕無法提供。本實驗室研究也申請中華民國專利與美國專利分別獲得證號 I729344 與 US11124867，如圖 15 及圖 16 所示，若能將專利與產業研究結合將對金屬模具使用上具有十足的前瞻與發展性。



圖 14 業界模具常壓電漿氮化示意圖



圖 15 中華民國專利



圖 16 美國專利

## 5. 致謝

本論文為科技部補助編號MOST 109-2221-E-011-087-MY3之專題計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，以及崧耀企業股份有限公司(Click Sun-Shine Corp.)之常壓電漿設備技術支援，特此致上感謝之意。

## 6. 參考資料

- [1] X光繞射儀(XRD), (n.d.). <https://sppic.ntust.edu.tw/p/406-1058-81296,r1589.php?Lang=zh-tw> (accessed May23, 2022).
- [2] Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM, 2016..
- [3] R.Bantle, A.Matthews, Investigation into the impact wear behaviour of ceramic coatings, Surf. Coatings Technol. 74–75 (1995) 857–868.
- [4] 楊春欽, 摩擦與磨耗, 科技圖書股份有限公司, 1984.
- [5] D.She, W.Yue, Z.Fu, C.Wang, X.Yang, J.Liu, Effects of nitriding temperature on microstructures and vacuum tribological properties of plasma-nitrided titanium, Surf. Coatings Technol. 264 (2015) 32–40.
- [6] J.Yang, Y.Liu, Z.Ye, D.Yang, S.He, Microstructure and tribological characteristics of nitrided layer on 2Cr13 steel in air and vacuum, Surf. Coatings Technol. 204 (2009) 705–712.
- [7] D.C.Wen, Plasma nitriding of plastic mold steel to increase wear- and corrosion properties, Surf. Coatings Technol. 204 (2009) 511–519.
- [8] D.-Guillén, G.-Gutiérrez, M.R.Díaz-Guillén, M.A.González-Albarrán, México C P 25280, Electrochemical Corrosion Performance of AISI D2 Tool Steel Surface Hardened by Pulsed Plasma Nitriding, Int. J. Electrochem. Sci. 8 (2013) 973–982.
- [9] A.R.Mashreghi, S.M.Y.Soleimani, S.Saberifar, The investigation of wear and corrosion behavior of plasma nitrided DIN 1.2210 cold work tool steel, Mater. Des. 46 (2013) 532–538.
- [10] S.Tianmin, H.Meng, T.H.Yuen, Impact wear behavior of laser hardened hypoeutectoid 2Cr13 martensite stainless steel, Wear. 255 (2003) 444–455.