



## 刮痕及夾雜物對鏡面拋光型 NAK80 模具鋼耐蝕性影響 Effects of scratches and inclusions on the corrosion resistance of mirror polished NAK80 mold steel

黃翊如<sup>1\*</sup>、邱六合<sup>1</sup>、陳建維<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大同大學機械與材料工程學系

<sup>2</sup> 台安特殊鋼鐵股份有限公司

\*E-mail: yiru20000728@gmail.com

### 摘要

本文旨在探討刮痕及夾雜物對鏡面拋光型 NAK80 模具鋼耐蝕性影響。實驗使用 NAK80 鏡面拋光等級析出硬化型模具鋼，經過切削、研磨、拋光後對加工面做極化和鹽霧測試，了解其耐蝕性以及腐蝕行為，且以光學顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、原子力顯微鏡觀察其微觀樣貌和表面化學元素；另外針對析出硬化型鋼料作晶界碳化物析出比較。實驗得出，拋光試片之表面粗糙度約為  $0.2\mu\text{m}$ ，其在  $3.5\text{wt}\%\text{NaCl}$  和鹼性切削液的條件下  $i_{\text{corr}}$  分別約為  $0.4$ 、 $0.005\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ；切削面及研磨面因有較多刀痕磨痕呈現出的耐蝕性較差，在  $3.5\text{wt}\%\text{NaCl}$  和鹼性切削液的條件下  $i_{\text{corr}}$  分別為  $1.0$  及  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ；經掃描式電子顯微鏡-能量分散光譜得出腐蝕點為材料本身之夾雜物亦或孔蝕，以夾雜物來看其硫含量較高，而孔蝕較低。鹽霧測試中，可觀察到試片皆呈現點蝕的現象。而針對析出硬化型鋼料作晶界析出物比較，得知瑕疵件晶界觀察到銅含量較高約為  $30\text{wt}\%$ ，這使得金屬鄰近晶界處銅含量降低，導致抗蝕性變差。實驗可知夾雜物為模具拋光面造成腐蝕的源頭，在鋼材選料時，可藉由光學顯微鏡初步判斷夾雜物多寡作為分級，以降低選材不當造成的成本損失。而 NAK80 析出硬化模具，須注意固溶處理階段富銅初晶物或析出物是否完全溶回晶粒。

**關鍵詞：**析出硬化型模具鋼、耐蝕性、夾雜物、拋光缺陷

### Abstract

The effects of scratches and inclusions on the corrosion resistance of mirror-polished NAK80 mold steel has been investigated. The experiment used NAK80 mirror polished grade precipitation hardened mold steel. After cutting, grinding, and polishing, polarization and salt spray tests were conducted on the machined surface to understand its corrosion resistance and corrosion behavior. Optical microscopy, scanning electron microscopy, and atomic force the microscopic appearance and surface chemical elements were observed with a microscope; in addition, grain boundary carbide precipitation was compared for precipitation hardened steel materials. Experiments show that the surface roughness of the polished test piece is about  $0.2\mu\text{m}$ , and its  $i_{\text{corr}}$  is about  $0.4$  and  $0.05\sim 0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  under the conditions of  $3.5\text{wt}\%\text{NaCl}$  and alkaline cutting fluid respectively; in comparison, the cutting surface, The grinding surface has poor corrosion resistance due to many tool marks and grinding marks. Under the conditions of  $3.5\text{wt}\%\text{NaCl}$  and alkaline cutting fluid, the  $i_{\text{corr}}$  is approximately  $1.0$  and  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$  respectively. Scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy revealed that the corrosion points are inclusions in the material itself or pitting corrosion. Judging from the inclusions, the sulfur content is higher, but the pitting corrosion is lower. During the salt spray test, it was observed that all test pieces showed pitting corrosion. Comparing the precipitation of grain boundary carbides in precipitation hardened steel materials, it was found that



the copper content observed at the grain boundaries of defective parts was higher, about 25~30wt%, which reduced the copper content near the grain boundaries of the metal, resulting in poor corrosion resistance. . Experiments show that inclusions are the source of corrosion on the polished surface of the mold. When selecting steel materials, an optical microscope can be used to initially judge the number of inclusions for classification, so as to reduce cost losses caused by improper material selection. For NAK80 precipitation hardened molds, attention must be paid to whether the copper-rich precipitates are completely dissolved back into the grains during the solution treatment stage.

**Keyword : Precipitation hardened mold steels 、 Corrosion resistance 、 Inclusions 、 Polishing defects**

## 1. 前言

模具從銑床及綜合加工機，放電加工等成形粗加工，再經研磨及拋光等精密鏡面生產技術是重要的工序。而拋光後之粗糙度及光滑平整，許多廠商通常用實作經驗的方式去目視拋光後模具面品質是否達到最佳化，因而導致模具鏡面的品質無法確認，除了影響材料的美觀以外也無法達到客戶品質之要求。本文旨在探討刮痕及夾雜物對鏡面拋光型NAK80模具鋼耐蝕性影響。實驗使用預硬鋼NAK80鏡面拋光等級析出硬化型模具鋼，其析出硬化熱處理於鋼料購入前完成，經過切削、研磨、拋光後對加工面做極化和鹽霧測試，了解其耐蝕性以及腐蝕行為，且以光學顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、原子力顯微鏡觀察其微觀樣貌和表面化學元素；另外針對析出硬化型鋼料作晶界碳化物析出比較。

## 2. 實驗步驟

### 2.1. 實驗用料與機械加工及拋光

使用光譜分析儀 OXFORD Foundry-Master X'Pert OES，確認用料化學成分，結果如表 1，用料皆符合標準規範。機械加工及拋光部分：試片切割使用中澤 TNC 230AS 切割機及日本 N.P.S. WA120NA9C 砂輪片，進刀採手動式操作，進刀時同時噴出冷卻液以防試片及砂輪片過熱；溼式研磨使用號數#100、#2000 水砂紙，即粒徑為 150 $\mu$ m、6.5 $\mu$ m，研磨方式採手工式，即在長條狀水砂紙上來回研磨直至試片表面刮痕呈現同一方向，以水砂紙研磨的同時研磨台出水口會持續使水流至砂紙上以避免試片研磨過熱；拋光試片分成切削後以 1 $\mu$ m 氧化鋁粉拋光，以及研磨至 2000 號數後以 1 $\mu$ m 氧化鋁粉拋光。部份試片以銅電木粉作鑲埋，經研磨拋光後用 Marble 腐蝕液(4g CuSO<sub>4</sub>+ 20ml HCl + 20ml DI water)腐蝕，以作為金相試片。

表 1，化學成分檢驗結果

	碳(C)	矽(Si)	錳(Mn)	鉬(Mo)	鎳(Ni)	鋁(Al)	銅(Cu)
NAK80 標準成分	0.05-0.18	0.05-1.00	1.0-2.0	0.1-0.4	2.5-3.5	0.5-1.5	0.7-1.5
實驗用料	0.102	0.33	1.2	0.23	2.7	0.79	1.1

### 2.2. 光學顯微鏡觀察

利用光學顯微鏡觀察試片微觀視角下的樣貌，本實驗分析使用 Olympus-BX60M 光學顯微鏡，試片經切削、研磨後產生刀痕、磨痕，以及拋光面中的夾雜物或是孔蝕、流星紋、氧化層等。上述這些在光學顯微鏡成像上會因其有凹凸面和平面區而有黑白顏色之區別，試片的平面區會完全反射光源而呈現白色，而凹凸區隨與入射光源不同程度的反射光會呈現灰色至黑色。以此對各個加工面之刀痕、磨痕密集度、寬度以及拋光面之夾雜物、孔蝕、氧化層位置等做初步判斷。金相試片觀測其在晶粒邊界是否有析出物。



### 2.3. 場發射掃描式電子顯微鏡

使用 HITACHI 公司之 SU8200 場發射掃描式電子顯微鏡(Field Scanning Electron Microscope)觀察刀痕、夾雜物、孔蝕等缺陷，並利用其能量分散光譜儀(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)點分析功能，判斷夾雜物之元素，以及金相試片在晶界上和晶粒區的 Cu 含量。進入儀器前須將試片貼上銅膠或以銅電木粉進行鑲埋使其利於導電，並進入 80°C 的烘箱烘 8 小時以上以確保試片無水分殘留而影響儀器壽命。

### 2.4. 原子力顯微鏡

原子力顯微鏡其原理利用其微小探針及試片表面原子間的凡德瓦爾力來量測試片的 3D 樣貌。以此量測含出現拋光缺陷之試片表面 3D 圖。本實驗使用大同大學 Digital Instruments DI 5000 原子力顯微鏡，在  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  的範圍內掃描  $512 \times 512$  點，掃描速率為 0.5~0.8 Hz，XY 平面解析度為 2nm，Z 軸解析度為 0.01 nm。

### 2.5. 表面粗糙度

使用日製 Mitutuyo SurfTest SV-400 表面粗糙儀對各個機械加工後的表面進行量測。藉由儀器測得中心線平均表面粗糙度(Ra)，定義如下[1]：

平均表面粗糙度(Ra)：

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx$$

設於表面輪廓曲線上擷取長度  $L$ ，以該長度內中心現為 X 軸，擷取長度內所有斜線部分面積之和除以測定長度  $L$  所得之值。即為 Ra。本實驗探針測量方向垂直於刮痕方向，每個實驗試片測量三次後取平均，儀器掃描精度為  $80 \mu\text{m}$ ，掃描距離為 0.8mm，量測速度為 0.5mm/s。

### 2.6. 鹽霧試驗

參考 ISO 7253 規範使用可控溫鹽霧耐候試驗機模擬台灣海島型氣候的氣氛，將試片置於試驗機中 24 小時，相當於至於自然暴露環境約一年。藉由此試驗觀察切削面、研磨面、拋光面之腐蝕行為。

### 2.7. 極化試驗

本實驗使用 EG&G 362 三電極法進行電化學試驗，儀器外觀如 Fig\_，試驗使用參考電極為銀-氯化銀(Silver-silver chloride electrode)，輔助電極為白金(Pt)，實驗室片則為工作電極。腐蝕溶液使用 pH 值 9 的經濟型鹼性切削液及 pH 值 7 的 3.5%NaCl 水溶液。試驗時先將試片浸於腐蝕溶液直至開路電位起伏小於 1mV/h 後才開始檢測，掃描面積為  $10\text{mm}^2$ ，起始電位為 -0.3V 至終止電位 +1.0V，掃描速率為 10mV/s。所得塔佛曲線(圖 1.)，使用內建軟體分析各組試片之腐蝕電流密度( $i_{\text{corr}}$ )、腐蝕電位( $E_{\text{corr}}$ )、極化阻抗(Polarization resistance,  $R_p$ )、陽極塔佛斜率(Tafel slope,  $\beta_a$ )和陰極塔佛斜率(Tafel slope,  $\beta_c$ )。

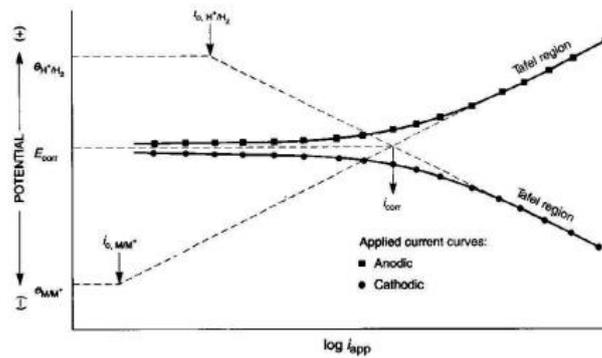
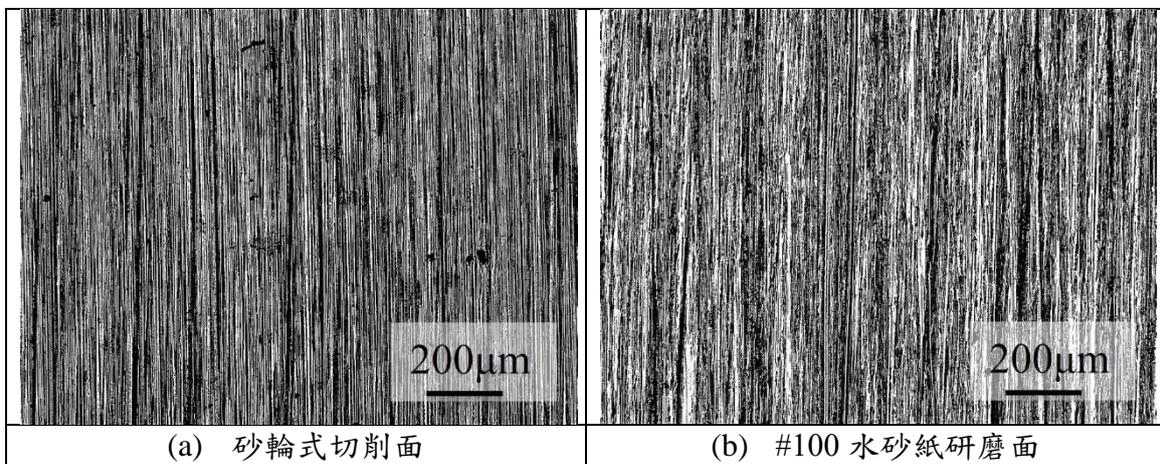


圖 1 塔佛曲線[2]

### 3. 結果與討論

#### 3.1 光學顯微鏡

圖 1 為 NAK80 模具各個表面機械加工面的光學顯微圖，圖(a)為砂輪機切割的切面，其等級與圖(b)所示之#100 水砂紙的刀痕或磨痕密度、深度差異不大，而圖(c)相對來看深度較淺；圖(d)為拋光狀態之試片，圖中可看到黑色點狀物，推測其一為夾雜物，其二為孔蝕。於圖(e)觀察到如同流星般的拋痕，其為氧化鋁粉在拋光期間拋粒卡在孔蝕中，藉而導致於孔洞為起點的磨痕。圖(f)右下角有試片氧化生鏽的痕跡，此試片拋光時間較其他試片還多將近 20~30 分鐘左右，此現象較易發生在濕式拋光上，此狀況導致模具表面拋光品質不良。圖 2 特寫出該工件有碳化物在晶粒邊界析出，圓圈區可看到白色不連續的圓狀物出現在晶界上。



(a) 砂輪式切削面

(b) #100 水砂紙研磨面

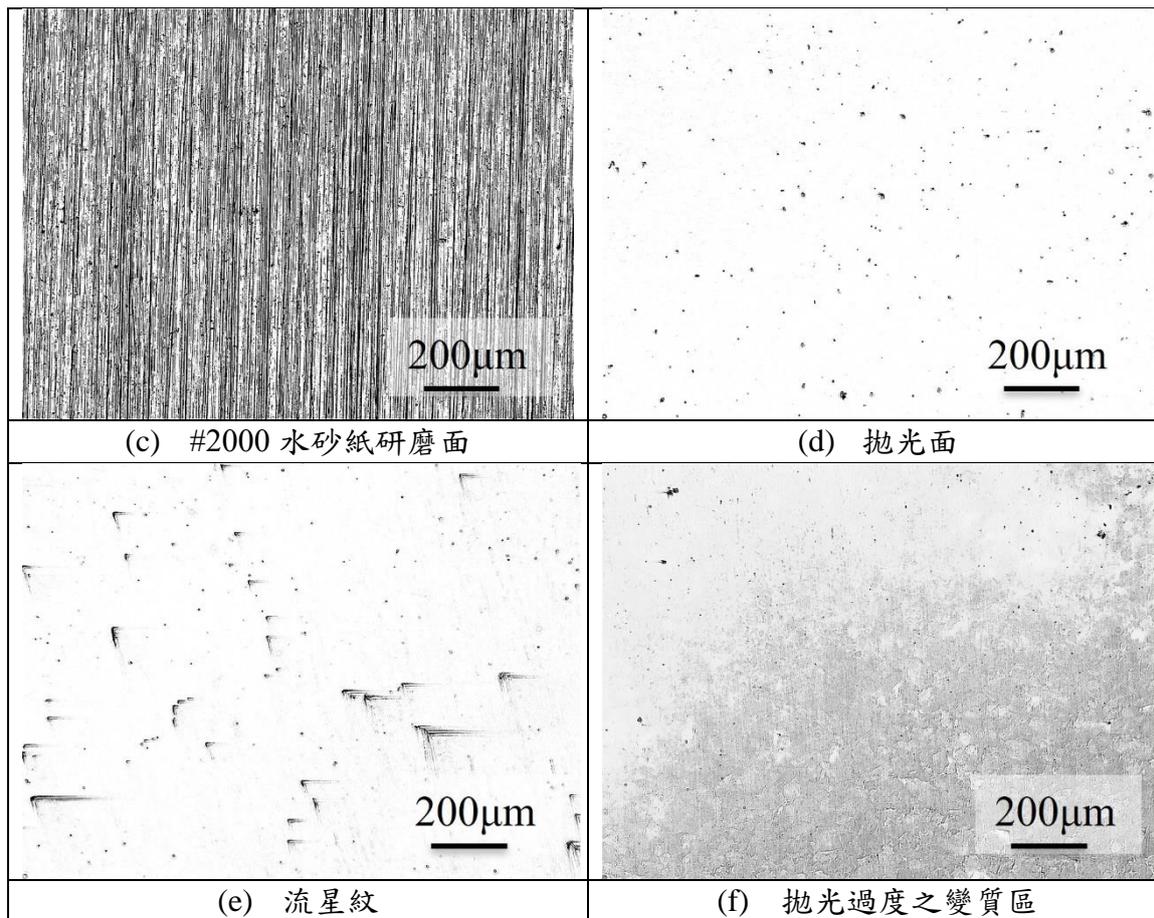


圖 2 NAK80 切削面、研磨面、拋光面以及拋光後產生之缺陷

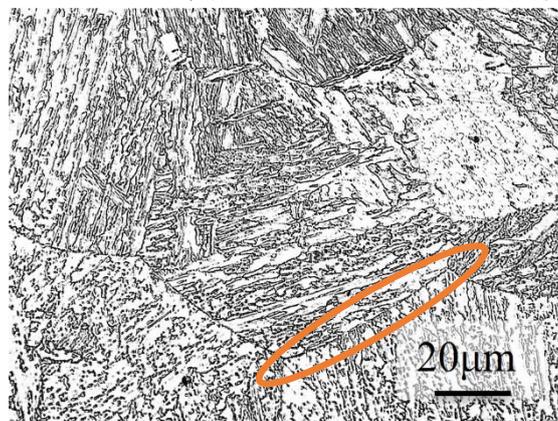


圖 3 心部晶界析出物 500 倍率

### 3.2 掃瞄式電子顯微鏡

圖 4 為 NAK80 晶粒邊界 SEM 顯微圖，由於基底為可導電的 Fe 基底因而在圖 4(b) 中黑灰色區域為試片基底，然而相較鐵基底析出物導電率較差因而作圖中呈現白色。由此得知在圖 4(b) 中能看到析出物散佈在晶粒及晶界上，圖 4(a) 高倍率下能更明顯看到析出物在晶粒邊界上，而從表 2 晶界點分析的結果得知其銅含量為 53wt% 晶粒則為 6wt%，推測其為含 Cu 的析出物集中在晶界，使得周遭呈現貧銅區。

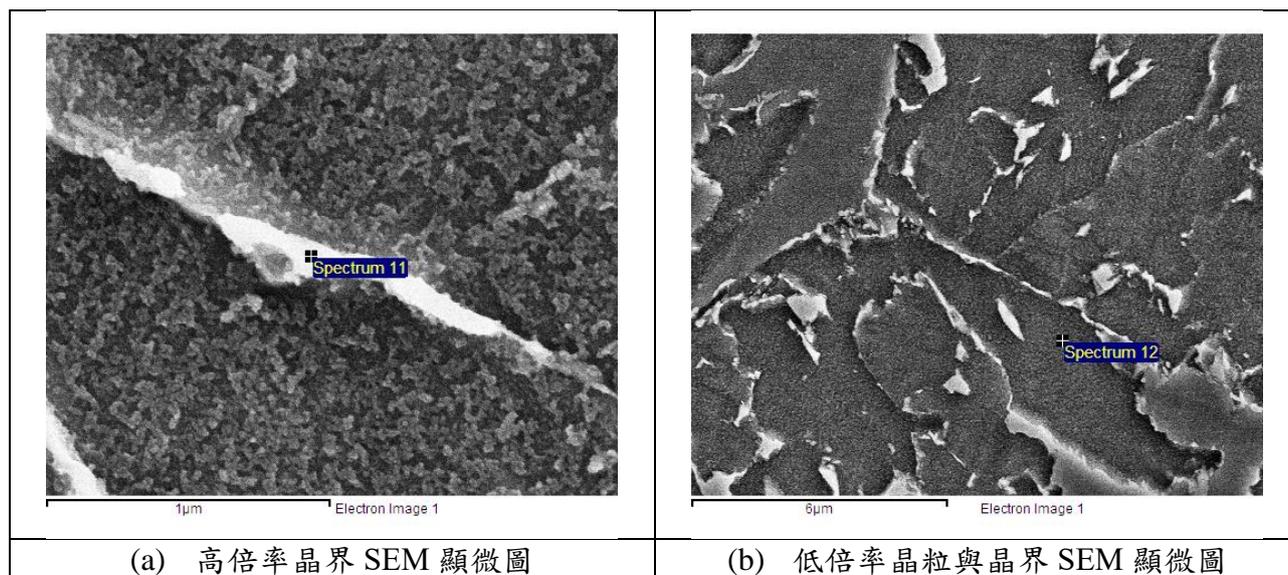


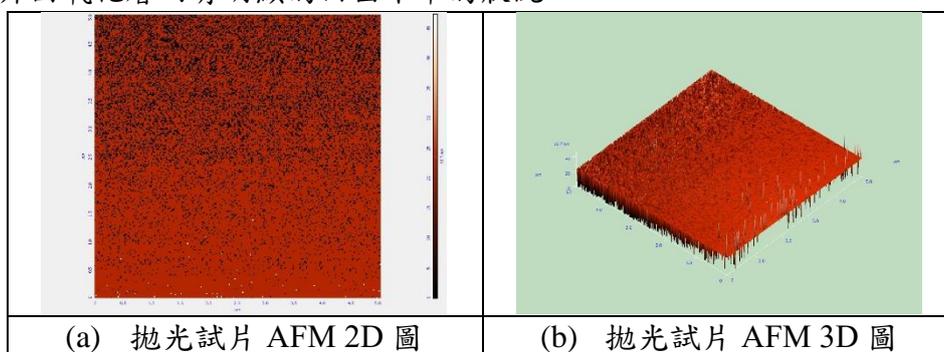
圖 4 SEM 微觀圖及 EDS 點分析測點

Element	晶界 Weight%	晶粒 Weight%
C K		4.66
Al K	16.07	0.98
Fe K		85.16
Ni K	30.15	3.32
Cu L	53.78	5.88
Totals	100.00	100.00

表 2 晶粒邊界 SEM-EDS 點分析化學成分結果

### 3.3 原子力顯微鏡

圖 5(a)、(b)為一拋光狀態良好之原子力顯微 2D、3D 圖，而圖 3(c)、(d)為因過度拋光產生氧化層之原子力顯微 2D、3D 圖。由圖看出一般拋光試片較為平整沒有明顯的起伏，而過度拋光之試片因氧化層而有明顯的凹凸不平的狀況。



(a) 拋光試片 AFM 2D 圖

(b) 拋光試片 AFM 3D 圖

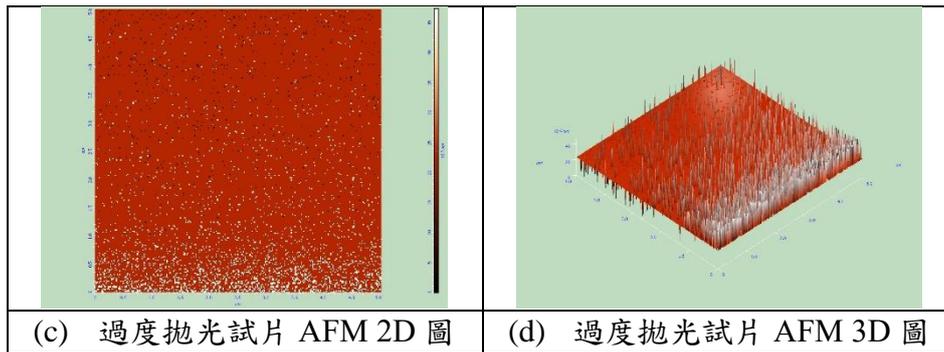


圖 5 一般拋光試片極過度拋光試片之原子力顯微 2D、3D 圖

### 3.4 表面粗糙度

圖 6 為 NAK80 不同表面機械加工狀態之表面粗糙度。其中#100 號水砂紙研磨面最粗糙為  $0.67\mu\text{m}$ ；#2000 號砂紙為  $0.35\mu\text{m}$ ；砂輪切削面為  $0.56\mu\text{m}$ ；拋光面則為  $0.24\mu\text{m}$ 。而有氧化層的過度拋光試片粗糙度達到  $0.32\mu\text{m}$ 。

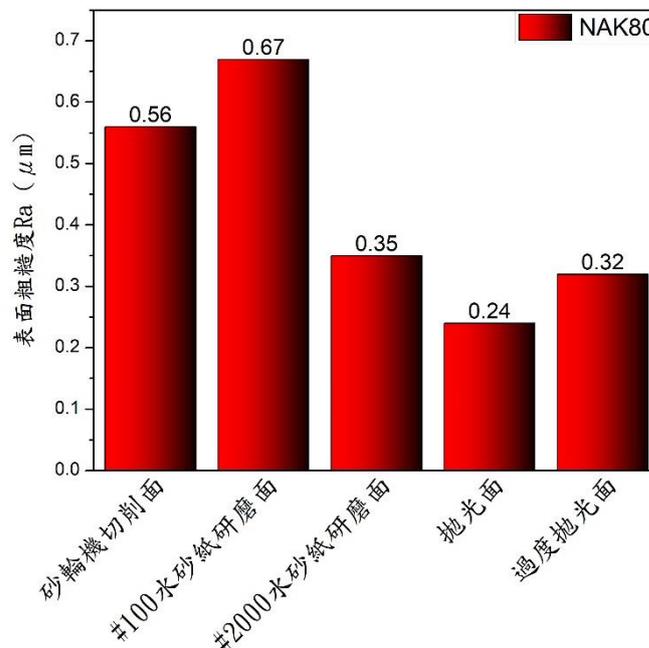


圖 6 NAK80 不同表面機械加工狀態之表面粗糙度樹狀圖

### 3.5 極化曲線

此次試驗以 pH 值 9 的鹼性切削液及 pH 值 7 的 3.5%NaCl 水溶液作為電解液，分別對切削面、研磨面、拋光面作極化測驗。以電解液來說，鋼料在切削液的环境下耐蝕性普遍較優，在鹼性切削液中腐蝕電流密度落在  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、腐蝕電位約落在  $-300\text{mV}$ ，在 3.5wt% NaCl 中性溶液中腐蝕電流密度落在  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、腐蝕電位落在  $-700\text{mV}$ 。而以機械加工面來看，切削面耐蝕性較差，其鹼性切削液和 3.5wt%NaCl 的條件下腐蝕電流密度分別為  $0.039$ 、 $0.58\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ；研磨與拋光面耐蝕程度較相近，在鹼性切削液中研磨及拋光面腐蝕電流密度分別  $0.002$ 、 $0.0006\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蝕電位  $-131$ 、 $-123\text{mV}$ ，而在 3.5wt% NaCl 中性溶液中研磨及拋光面腐蝕電流密度分別  $0.45$ 、 $0.46\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蝕電位  $-573$ 、 $-547\text{mV}$ 。

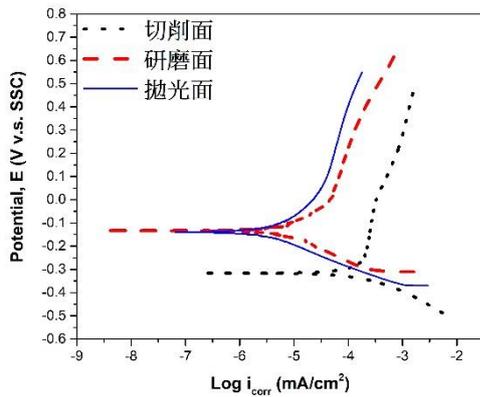


圖7 不同機械加工面之 NAK80 試片對 pH 值 9 的鹼性切削液之極化曲線

表 2 極化測試中 NAK80 實驗室不同機械加工面對鹼性切削液的電化學數據

	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{corr}$ (mV)
切削面	0.039	-314
研磨面	0.002	-131
拋光面	0.0006	-123

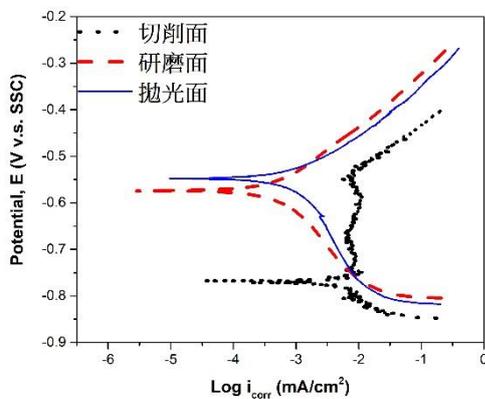


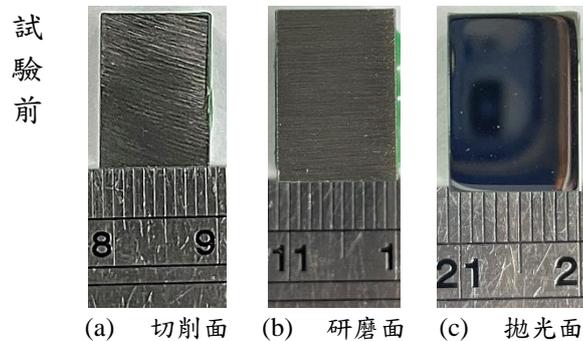
圖8 不同機械加工面之 NAK80 試片對 pH 值 7 的 3.5wt% NaCl 中性溶液之極化曲線

表 3 極化測試中 NAK80 實驗室不同機械加工面對 3.5wt% NaCl 中性溶液的電化學數據

	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{corr}$ (mV)
切削面	0.58	-768
研磨面	0.45	-573
拋光面	0.46	-547

### 3.6 鹽霧試驗

圖 8 為鹽霧試驗前後差異實物照，試片置於可控溫鹽霧耐候試驗機 24 小時後可看出研磨面的腐蝕狀況較為嚴重，而切削面狀況反而較輕微。其原因推測為切削面在機械加工過程有持續噴灑切削液，切削液本身有防鏽的作用，而研磨面在加工過程視接觸到含水的拋光盤，這可能導致其生鏽狀況加劇。



(a) 切削面 (b) 研磨面 (c) 拋光面

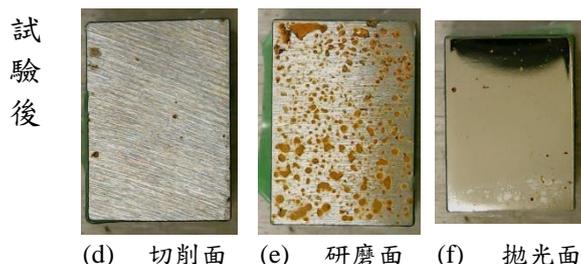


圖9，鹽霧試驗前後NAK80試片實物照

#### 4. 結果與討論

1. 砂輪機切割的切面等級#100 水砂紙差異不大，兩者粗糙度分別為  $0.56$  及  $0.673\mu\text{m}$ ，#2000 水砂紙相對來看深度較淺粗糙度為  $0.352\mu\text{m}$ ，拋光面則為  $0.243\mu\text{m}$ 。而有氧化層的過度拋光試片粗糙度達到  $0.317\mu\text{m}$ 。拋光狀態看到黑色點狀物，其一為夾雜物，其二為孔蝕。如同流星樣貌的拋痕，其為氧化鋁粉在拋光期間拋粒卡在孔蝕中，藉而導致於孔洞為起點的磨痕。過度拋光試片氧化生鏽的痕跡，此現象較易發生在濕試拋光上。
2. 於 SEM 顯微圖中可看到腐蝕後的試片不連續的析出物，從晶界點分析的結果得知其銅含量較高，推測其為含 Cu 的析出物集中在晶界，使得周遭呈現貧銅區。
3. 拋光狀態良好之原子力顯微 2D、3D 圖，較為平整沒有明顯的起伏，而過度拋光產生氧化層因而有明顯的凹凸不平的狀況。
4. 極化測驗以電解液來說，鋼料在切削液的環境下耐蝕性普遍較優，在 pH 值為 9 的鹼性切削液中腐蝕電流密度落在  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、腐蝕電位落在  $-300\text{mV}$ ，在 pH 值為 7 的 3.5wt%NaCl 中性溶液中腐蝕電流密度落在  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、腐蝕電位落在  $-700\text{mV}$ 。而以機械加工面來看，切削面耐蝕性較差，其鹼性切削液和 3.5wt%NaCl 的條件下腐蝕電流密度分別為  $0.039$ 、 $0.58\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ；研磨與拋光面耐蝕程度較相近，在鹼性切削液中研磨及拋光面腐蝕電流密度分別  $0.002$ 、 $0.0006\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蝕電位約  $-131$ 、 $-123\text{mV}$ ，而在 3.5wt% NaCl 中性溶液腐蝕電流密度分別  $0.45$ 、 $0.46\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蝕電位  $-573$ 、 $-547\text{mV}$ 。
5. 鹽霧試驗 24 小時後可看出研磨面的腐蝕狀況較為嚴重，而切削面狀況反而較輕微。其原因推測為切削面在機械加工過程有持續噴灑切削液，切削液本身有防鏽的作用，而研磨面在加工過程視接觸到含水的拋光盤，這可能導致其生鏽狀況加劇。

#### 5. 致謝

感謝工研院及台安鋼鐵-材料拋光技術規格化輔導計畫 E111-M12-045計畫案的支持，以及台安特殊鋼鐵股份有限公司之協助使本案例得以順利解決，特此致上感謝之意。

#### 6. 參考文獻

1. Richard K. Leach. (2014). Fundamental Principles of Engineering Nanometrology, 2<sup>nd</sup>, 246-261
2. Papavinasam, S. (2021). Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring. In Techniques for corrosion monitoring (pp. 45-77). Woodhead Publishing.
3. 陈再技, & 兰德年. (2001). 模具钢手册. 冶金工业出版社.
4. 莊東漢. (1990). 電化學原理於腐蝕研究上之應用. 防蝕工程, 4(3), 14-28.



5. 楊玉森, 許憲斌, 卓廷彬. (2014). 模具材料與熱處理. 五南書局, 34-45
6. 成百輛. (2005). 模具制造技能. 清華大學出版社有限公司, 80、116-123.
7. 孟繼洛. (2005). 機械製造. 全華科技, 台北市, 12-24.
8. 甄瑞麟. (2005). 模具製造工藝學. 清華大學出版社有限公司, 196、209.
9. Kiessling, R. (2001). Nonmetallic inclusions and their effects on the properties of ferrous alloys. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 6278-6283.
10. Isakov, E. (2008). *Cutting Data for turning of steel*. Industrial Press Inc..
11. Wranglen, G. (1974). Pitting and sulphide inclusions in steel. *Corrosion science*, 14(5), 331-349.
12. 經濟部標準檢驗局印行. (1982, May 20). 鹽水噴霧試驗法. 中國國家標準 CNC.  
<https://file.yizimg.com/357125/2012011018131668.pdf>
13. Badran, O., Kloub, N., & Al-Tal, M. (2008). The effect of shot peening and polishing on the pitting corrosion resistance of stainless steel. *Am. J. Appl. Sci*, 5, 1397-1402.
14. Karlberg, G., & Wranglen, G. (1971). On the mechanism of crevice corrosion of stainless Cr steels. *Corrosion Science*, 11(7), 499-510.
15. Poljacek, S. M., Risovic, D., Furic, K., & Gojo, M. (2008). Comparison of fractal and profilometric methods for surface topography characterization. *Applied Surface Science*, 254(11), 3449-3458.
16. 臺北市教育局 Mail2000 信箱. 原子力顯微鏡原理.  
<http://web1.knvs.tp.edu.tw/AFM/ch4.htm>
17. 柯賢文, 王朝正. 腐蝕及其防制(第四版), 全華圖書, 台北市, p1-135, 2022