

# 真空熱處理對麻田散鐵系不銹鋼磨耗行為之影響

## Effect of Vacuum Heat Treatment on the Wear behavior of Stainless Plastic Mold Steels

邱六合<sup>\*1</sup>, 李勁宏<sup>1</sup>, 葉書宏<sup>1</sup>, 羅萬中<sup>2</sup>, 黃建龍<sup>2</sup>

L. H. Chiu<sup>\*</sup>, J. H. Lee<sup>1</sup>, S. H. Yeh<sup>1</sup>, W. C. Lo<sup>2</sup>, C. L. Huang<sup>2</sup>

1. 大同大學材料工程系

2. 金屬工業研究發展中心

### 摘要

本研究進行鏡面模具鋼經不同淬火、回火真空熱處理之微結構及耐磨耗行為等探討，選擇 JIS SUS 420 J2，ASSAB STAVAX ESR 麻田散鐵系不銹鋼作為研究材料。實驗試片使用真空爐在 1000、1020、1050°C 三種溫度進行 3kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬，並於 180~560°C 的溫度區間進行不同溫度回火。結構分析包含 OM、XRD、SEM 及尺寸變形觀察，並進行磨耗試驗等機械特性。研究結果顯示，試片在升至 1020°C 持溫 25min 後經 N<sub>2</sub> 氣淬，硬度可達到 53.7±0.1HRC(SUS420J2) 和 52.7±0.1HRC(STAVAX ESR)，並在 480°C 回火可以觀察出有二次硬化的現象。由慢速掃描速率 1.1°/min 之 XRD 分析，可知 SUS 420 J2 及 STAVAX ESR 經氣淬及回火後試片主要結構均為 Martensite。由質量損失可知，試片氣淬後經 250°C 回火 3 小時兩次其重量損失量是最少的，可知在低溫回火對麻田散鐵系不銹鋼模具鋼之耐磨性較佳。

**關鍵字：**鏡面模具鋼、真空熱處理、氣淬、磨耗

### Abstract

In this study, too plastic mold steels have been vacuum heat treated by different quenching and tempering processes. The

JIS SUS 420 J2 and ASSAB STAVAX ESR martensitic stainless plastic mold steels were used as the experimental materials. A series of vacuum heat treatment has been conducted at austenitizing temperature, 1000°C, 1020°C, 1050°C and tempering temperature ranging from 180 to 560°C to obtain the tempered martensitic microstructure. The electrochemical polarization analysis, microstructure, X-ray diffraction and hardness measurements of the treated specimens were performed. The results have shown that the hardness of SUS420J2 and STAVAX ESR specimens were reached to 53.7 ± 0.1 and 52.7 ± 0.1 HRC, respectively, by austenitizing at 1020°C for 25 minutes and then N<sub>2</sub> gas quenching. The secondary hardening was observed. The XRD patterns of SUS 420J2 and STAVAX ESR specimens gas quenched and tempered at given temperature show that the dominant peaks of martensite phase are present. The results of the cumulative mass loss ( mg ) of wear specimens showed that the specimen after gas quenching and following by 250°C tempering

for martensitic stainless mold steel has the best wear resistance among all tested conditions.

Keywords: Plastic mold steel, Vacuum heat Treatment, Gas quench, Wear test.

## 1. 前言

機械日益複雜及性能提昇，材料零件面對更嚴苛的工作環境，表面性能如抗蝕性、抗模耗性及耐疲勞性之需求也越來越殷切[1][2]。又以模具鋼因常處於高溫且具磨耗及腐蝕之嚴苛環境下，除需具備一般工具鋼之常溫機械性質外，更應具備良好之高溫性質，國內高品質塑膠模具鋼射出成形用模具需求日增，所以模具鋼的選用必須具備高強度、硬度、耐熱性、耐磨耗性、耐熱衝擊性及耐腐蝕性 [3]，可以大伏的提高模具使用壽命，例如：AISI H13 工具鋼[4]及 AISI 420 麻田散鐵系不銹鋼 [5]。

麻田散鐵系不銹鋼與肥粒鐵系、沃斯田鐵系不銹鋼相比，其具有良好的機械性質、耐磨耗性與中等級的抗腐蝕性能，而使麻田散鐵系不銹鋼廣泛的被使用於製造工業中的結構零件或耐蝕、耐磨、耐震動等高應力零件利用不同的熱處理可改變其性質進而可 utilized 在所需的工件上[6]。為了能得到最佳的韌性及機械強度所以對其選用適當的熱處理固溶淬火與回火處理是需被重視的。然而經淬火回火處理後之 420 不銹鋼其晶體結構、微觀組織、碳化物的固溶析出及化學成份均會有所改變，並影響其耐蝕性質及耐磨耗性質[7]。

塑膠模具業界常用具抵抗磨耗及腐蝕組合的 JIS SUS 420 J2 麻田散鐵系不銹鋼，以及高鏡面塑膠模具鋼除了有上述之耐磨、抗蝕特性之優點，更重要的是其高光滑度的表面，可用以生產光學產品如：照相機、太陽眼鏡及分析儀器等產品的 ASSAB STAVAX ESR 高鏡面塑膠模具鋼。本實驗對此兩種鋼料施以適當的真空

淬火及回火處理，並進行處理試片之尺寸變形、硬度及耐蝕性等實驗。變形量分析以探討有關熱處理製程參數對試片形狀穩定性之影響；利用極化曲線評估耐蝕性；硬度量及磨耗特性來測評估其機械特性。

## 2. 實驗方法

### 2.1 試片製備

本實驗採用金耘鋼鐵股份公司的 SUS 420 J2 及台灣盛百股份公司的 STAVAX ESR 兩種麻田散鐵系不銹鋼，由輝光放電分析儀 (GDOES,LECO GDS-750)分析所得成分如 Table.1 所示，符合 AISI 之成分規範。供金相觀察，硬度試驗，電化學分析檢測之試片，係由直徑  $\phi$  20mm 棒材，沿截面切割下厚度 3mm 的圓盤行試片以 120 號砂紙依序將上下截面磨至 1200 號砂紙，再拋光至鏡面程度 Ra 值約 0.1 $\mu$ m。磨耗試片，尺寸為 12.7mm x12.7mm x12.7mm 立方體。

試片經淬火回火熱處理前清潔時採用超音波振盪，將試片置於盛裝酒精的容器中振盪 5 分鐘，再將之浸於丙酮中振盪 5 分鐘。

### 2.2 真空硬化熱處理

為防止試片脫碳及氧化，故採用真空硬化熱處理。首先將試片於 600、850 $^{\circ}$ C 進行均溫預熱，持溫 30 分鐘，接著升溫至 1000 $^{\circ}$ C~1050 $^{\circ}$ C 沃斯田體化溫度進行持溫，然後移到前腔噴入 1~3kg/cm<sup>2</sup> 氮氣冷卻。並分別於 180~600 $^{\circ}$ C 不同回火溫度，持溫 3 小時兩次。真空爐裝置為臻龍公司製造之實驗用雙腔式真空熱處理爐如 Fig.1 所示。實驗流程詳示於 Fig2。

Table.1 Chemical compositions of the specimens

Wt%	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Fe
STAVAX ESR $\Phi$ 20	0.389	0.90	0.44	0.02	0.001	0.301	12.99	Bal.
SUS 420 J2 $\Phi$ 20	0.322	0.4	0.44	0.02	0.002	0.023	12.17	Bal.

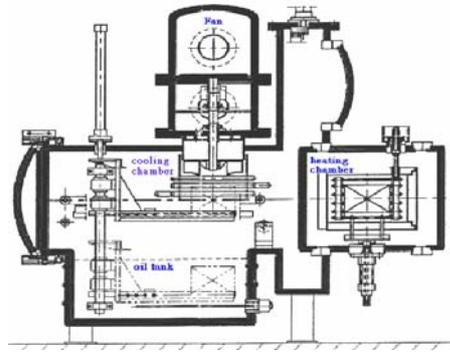


Fig. 1 Schematic diagram of two-chamber vacuum furnace

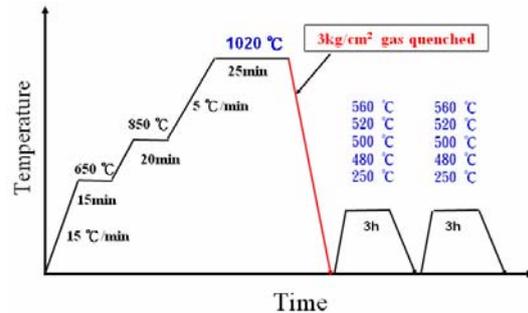


Fig. 2. Experiment at flow chart.

## 2.3 試片分析

### 2.3.1 微觀組織觀察

金相觀察以 Marble (4g CuSO<sub>4</sub> + 20ml HCl + 20ml water) 作為化學腐蝕液，並以 Nikon OPTIHOT-100 光學顯微鏡觀察淬火回火件的金相組織。

### 2.3.2 硬度試驗

硬度試驗用 Matsuzawa Seiki MARK-M2 型洛氏 (Rockwell) 硬度試驗機，測試不同淬火及回火製程之試片硬度值變化。每一試片均打三點洛氏硬度值 (HRC)，再求其平均值。

### 2.3.3 XRD 分析

XRD 分析使用 Rigaku X 光繞射儀配合銅靶 ( $\lambda = 0.15418\text{nm}$ ) 對試片進行析，繞射角度由 40° 到 85°，掃描速率為每分鐘 1.1 度。

### 2.3.4 變形量測試

變形量測試使用 Mitutoyo 之防塵防水數位外徑測微器，每次量測前先歸零；且量測時室溫要維持在 20°C，並對要測量之長量測到五次相同的數值即為所求之值。

## 2.2.5 電化學試驗

極化曲線分析使用 EG&G 362 恆電位儀。試驗溶液為 3.5wt% NaCl 水溶液，不銹鋼試片為工作電極，以飽和氯化銀電極 (SSE) 為參考電極，白金電極為輔助電極，以 1mV/s 之掃描速度，由 -0.6V 至 0.9V 的電位範圍區間進行曲線的量測。

## 2.2.6 磨耗試驗

磨耗試驗係使用 plint 磨耗試驗機 (PLINT TE53/8428)，以 Block-on-Roller 之磨耗方式實施，其對磨材為 AISI O1 冷作模具鋼，係經淬火硬化處理至硬度 62~63 HRC，如 Fig.3 所示。試驗前對磨 Roller 以 1000 號砂紙研磨，再經酒精及丙酮中進行 10 分鐘的超音波洗淨。磨耗試驗機轉速設定為每分鐘 200 轉 (200rpm)，進行 8000 轉、16000 轉及 24000 轉 (約 43.9 米)，施以磨耗試片的正向力以 71.4N、95.9N 及 120.4N，將磨耗後的試片及對磨材 Roller 洗淨後量測其質量損失 [8]。

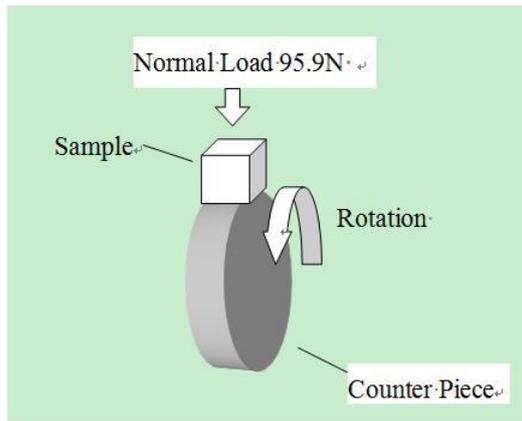
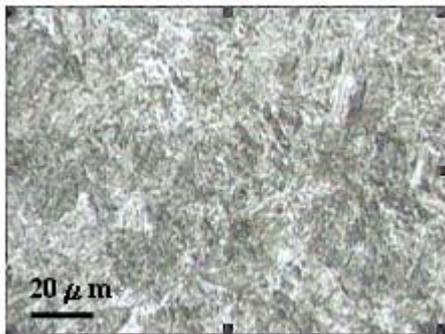


Fig.3 Schematic diagram of wear test

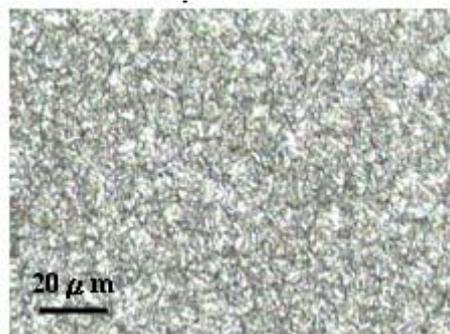
### 3.結果與討論

#### 3.1 微觀組織

SUS 420 J2 與 STAVAX ESR 之收料材料，再 1020°C 溫度持溫後進行 3kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬，並於 180~560°C 的溫度區間進行不同溫度回火。經 Marble (4g CuSO<sub>4</sub> + 20ml HCl + 20ml water) 腐蝕後之微觀組織如 Fig.5(a) (b)所示。由圖可以看出 SUS 420 J2 與 STAVAX ESR 經氣淬及 480°C 回火之微觀組織可以發現均為典型的回火麻田散體組織。



(a)



(b)

Fig. 5. Micrographs of stainless steel specimen gas quenched and tempered at 480°C for (a) SUS 420 J2 and (b) STAVAX ESR

#### 3.2 X-ray 繞射分析

Regaku X光繞射儀配合銅靶 ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) 對試片進行結構分析，X-ray 繞射圖形依JCPDS卡對照，確定其結構變化。試片在1020°C持溫25min後以氣淬及氣淬後分別以250°C、480°C、500°C、520°C及560°C回火之X-ray繞射圖。由慢速掃描速率1.1°/min XRD分析，可知SUS 420 J2及STAVAX ESR 經氣淬及不同溫度回火後試片主要結構均為麻田散體 (Martensite)，並無明顯殘留沃斯田鐵相。

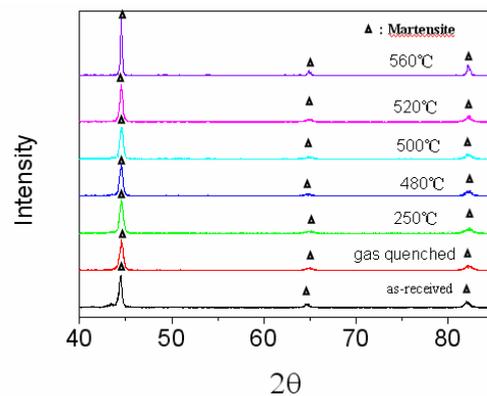
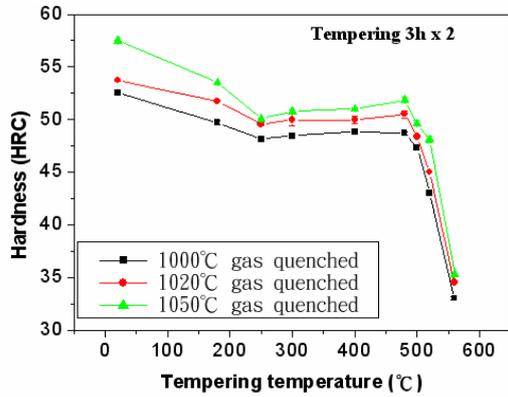


Fig.6 XRD patterns of STAVAX ESR specimens gas quenched and tempered at given temperature.

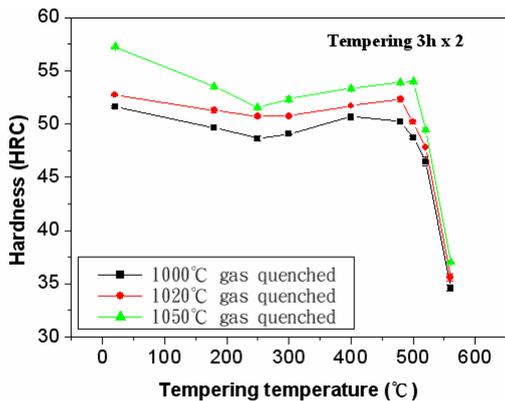
#### 3.3 HRC 硬度試驗

傳統上，模具鋼耐磨性可以硬度來進行預估，其中洛氏硬度是一種簡單且能有效反應材料的方法。Fig. 7 分別為 SUS 420 J2 試片及 STAVAX ESR 試片在 1000°C，1020°C 及 1050°C 持溫 25min 後以氣淬及氣淬後分別以 250°C、480°C、500°C、520°C 及 560°C 回火之硬度曲線圖。試片經 3kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬後，SUS420J2 及 STAVAX ESR 的硬度值分別為 53.7±0.1HRC 和 52.7±0.1HRC。由圖中可

看出 1050°C 持溫 25min 後氣淬及回火的硬度曲線其硬度都明顯高於兩者，乃因在 1050°C 沃斯田鐵化溫度較高，其晶粒會生長而變較大所以硬化能較強導致回火硬度會比在 1000°C 及 1020°C 持溫下還硬。



(a)



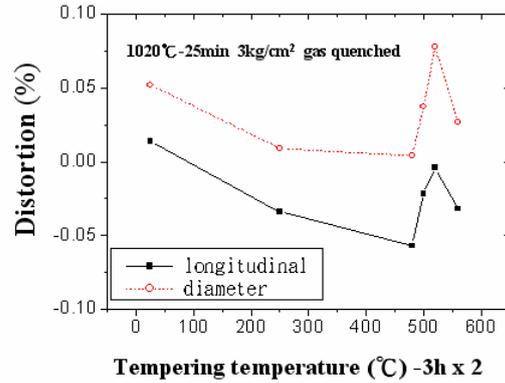
(b)

Fig. 7 Hardness of (a) SUS 420J2 and (b) STAVAX ESR specimens as function of the tempering temperature.

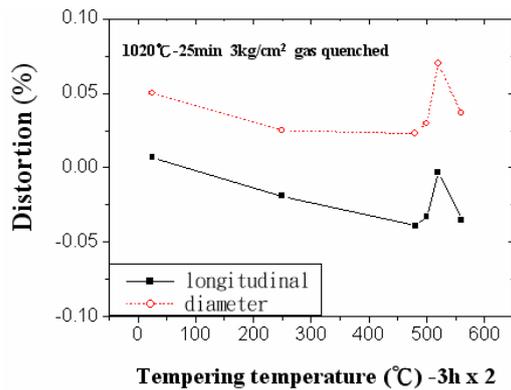
由 Fig. 7 之回火硬度曲線可看出，SUS 420 J2 及 STAVAX ESR 試片的硬度值隨著回火溫度增加而有遞減到 250°C 的趨勢，但其隨後漸增到 480°C 時有二次硬化的現象產生。顯示經過 480°C 回火會有碳化物析出效益最佳，除了 Cr 之外其他元素例：Mo, V 均可微細析出於基地內，使晶格變形或抑制差排滑移而產生二次硬化現象。

### 3.4 變形量測試

Fig. 8 分別為尺寸  $\phi 15 \times 120$  mm 之 SUS 420J2 及 STAVAX ESR 試片氣淬後經不同回火溫度之尺寸變化關係圖。由圖中可看出 STAVAX ESR 的變形量小於 SUS 420 J2 之變形量。



(a)



(b)

Fig. 8 Distortion of (a) SUS 420 J2 and (b) STAVAX ESR specimens as function of the tempering temperature

由 Fig. 8 可知不論是 STAVAX ESR 或 SUS 420 J2 在淬火時固溶於面心立方之沃斯田體中的碳原子在快速冷卻時，來不及擴散出來而陷在沃斯田體的晶格中，使晶格變型為體心正方(bct)，所以在剛淬火時變形量很明顯的會最大，之後隨著回火溫度的上昇而使碳原子由晶格中可以擴散出來使得變形量有減少的趨勢。由 Karl-Erik Thelning 等人提到當殘留的沃

斯田轉變成麻田散體體積會增加 4.2%[9] 所以在高溫回火 500°C 及 520°C 時之變形量有明顯的上升的趨勢，但在升高溫至 560°C 時則同前面的狀況碳原子由晶格中可以擴散出來使得變形量有減少的趨勢。

### 3.5 動態極化曲線分析

針對兩種鋼料，探討不同回火溫度對耐腐蝕性質的影響，特別以 SUS 420 J2 與 STAVAX ESR 試片氣淬後及經 250°C~520°C 回火後作極化曲線分析，試驗結果如 Table.2 所示。顯示在相同的熱處理條件下，STAVAX ESR 擁有較佳的抗腐蝕性質。

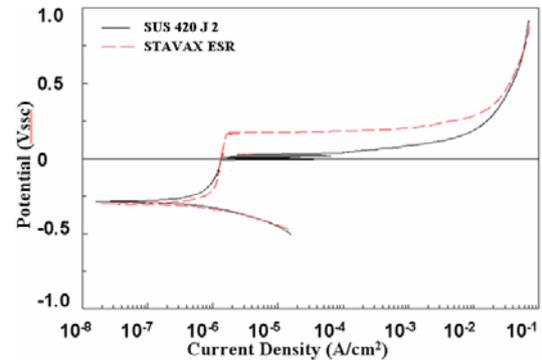
Table 2. Current density of SUS 420 J2 and STAVAX ESR specimen produced at given condition

Processing	SUS 420 J2	STAVAX ESR
AS Quench	$2.1 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$
1020°C + 250°C (3h x2)	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$
1020°C + 480°C (3h x2)	$2.2 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$
1020°C + 500°C (3h x2)	$2.4 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-7}$
1020°C + 520°C (3h x2)	$2.2 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$

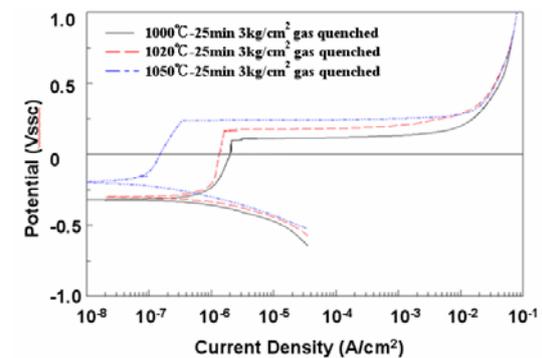
SUS 420J2 及 STAVAX ESR 試片氣淬後經 250°C 回火之極化曲線如 Fig. 9 (a) 所示。SUS 420 J2 及 STAVAX ESR 試片之腐蝕電流密度差異甚小為  $1.8 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$  和  $1.5 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$  但 STAVAX ESR 試片經 250°C 回火的極化曲線有明顯的鈍化區 (passive region) 大於 SUS 420 J2，亦即這些材料雖然會生成氧化物使其發生鈍化，金屬會在此溶解腐蝕，因此電流密度增加。因為溶解出來的金屬離子中含有鉻離子，可以與水結合產生氧化鉻的沉澱，再生成鈍化膜保護底下的金屬基

材。

再由 Fig. 9 (b) 可得知 STAVAX ESR 在 1000°C、1020°C 及 1050°C 三種沃斯田鐵化溫度持溫 25 分鐘經由 N<sub>2</sub> 氣淬後於 250°C 回火 3 小時兩次可發現在沃斯田鐵化溫度在 1050°C 這組腐蝕電流密度  $4.6 \times 10^{-8} \text{A/cm}^2$  明顯優於 1000°C 腐蝕電流密度  $1.9 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$  及 1020°C 腐蝕電流密度  $1.5 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$  由此可知 1050°C 這組的耐蝕性是最佳的，是因為在 1050°C 沃斯田鐵化溫度比另兩組高所以在高溫沃斯田鐵化過程中，Cr 與 Mo 原子溶入鋼材中的量會比另兩組還多，而使其耐蝕性被提高是可預期的。



(a)



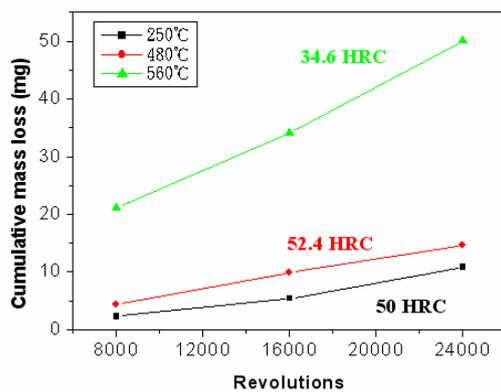
(b)

Fig. 9. (a) Polarization curves of SUS 420 J2 and STAVAX ESR specimens gas quenched and tempered at 250°C (b) Polarization curves of STAVAX ESR specimens austenitized at 1000°C, 1020°C and 1050°C, after gas quenched and tempered at 250°C.

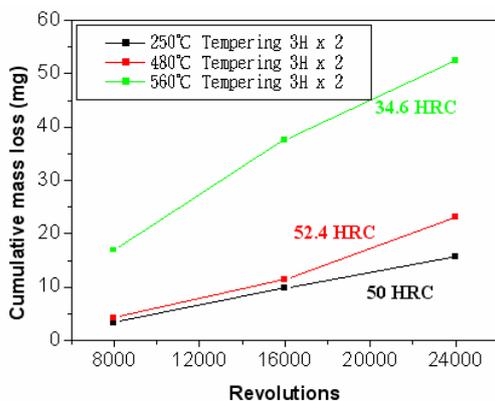
### 3.6 磨耗試驗

磨耗實驗整理如 Fig. 10 所示。在 95.9N 低荷重下，SUS420 J2 和 STAVAX ESR 損失量差異不大，但若增加荷重到 120.4 N 即可發現 SUS 420 J2 的質量損失會比 STAVAX ESR 多，由此可知在加荷重到 120.4 N 可明顯的看出 SUS 420 J2 的耐磨特性比 STAVAX ESR 差。

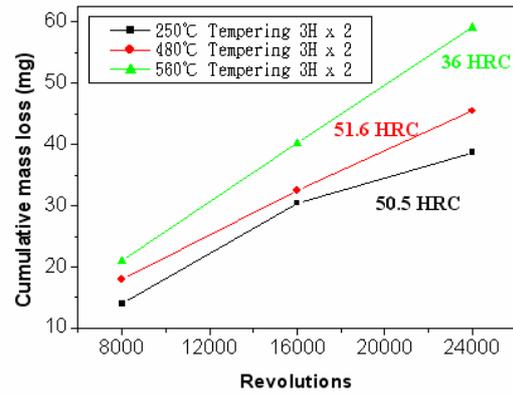
由 Fig. 10 可知質量損失量可知在 SUS420J2 及 STAVAX ESR 試片在 1020 °C (沃斯田體溫度)持溫後，進行 3kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬分別在 250°C 回火 3 小時兩次其質量損失量是最少，所以判斷其在 250 °C 回火的試片在三種(71.4 N、95.9 N、120.4 N)不同荷重下其耐磨耗性(約 4.06 mg，10.86 mg、15.7 mg)是最好的。



(a)95.9N



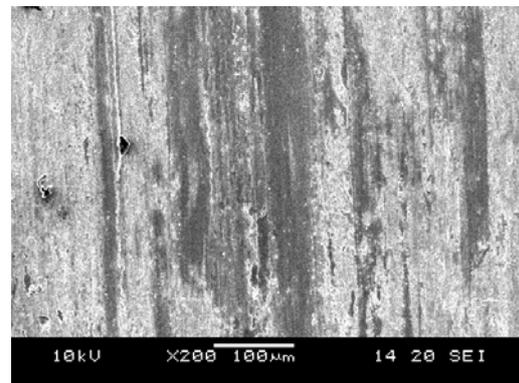
(b)120.4N



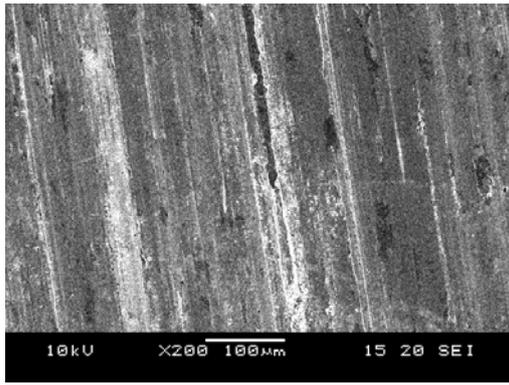
(b)120.4N

Fig. 10 Cumulative wear mass loss of worn (a) STAVAX ESR specimens under the load of 95.9 N, and (b)120.4 N, (c) for worn SUS 420 J2 specimens under the load of 120.4 N

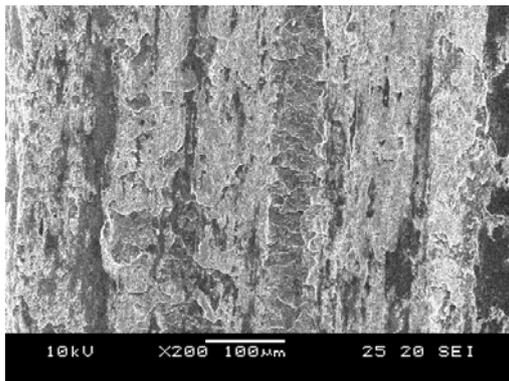
從 Fig. 11 可知 STAVAX ESR 試片在 1020°C 持溫後，進行 3kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬分別對回火於 250°C 和 480°C 回火(硬度值 50 和 51HRC)去做比較，可知其大都為黏著磨耗和磨料磨耗。至於在 560°C (硬度值 35 HRC)回火的試片可看出大都為黏著磨耗。因為雖然為相同的材質但硬度差異很大，所以可看出較硬的試片大都為黏著磨耗和磨料磨耗，較軟的試片大都為黏著磨耗。至於荷重增加，可看出其磨耗機制不變，差別在於磨耗機制會更明顯的顯現出來。



(a)



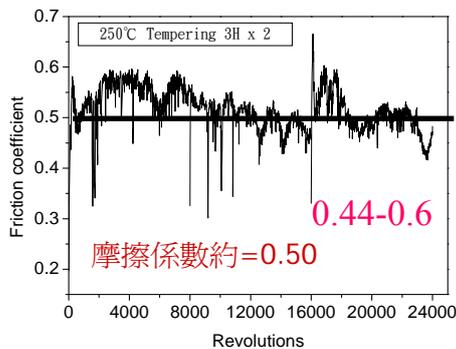
(a)



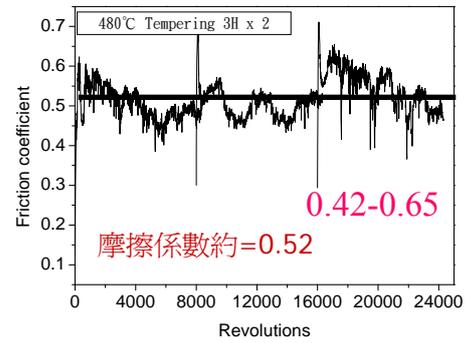
(b)

Fig. 11. Worn morphology of STAVAX ESR specimen tempered at (a) 250°C, (b) 480°C, (c) 560°C, after 24000 revolution testing at a load of 95.9 N.

磨耗試片之摩擦係數對轉速之關係圖如 Fig. 12 所示。由 Fig. 12 摩擦係數來看，相同的材質同樣的荷重下摩擦係數較低者其質量損失量也較少，所以由摩擦係數圖來判斷 250°C 回火的摩擦係數皆比在 480°C 回火的摩擦係數還低，與重量損失圖的結果相符。



(a)



(b)

Fig. 11 Friction coefficients of STAVAX ESR steel specimens in given conditions under the load of 95.9 N

#### 4. 結論

- (1) X-ray 繞射分析所得 SUS 420 J2 與 STAVAX ESR 經淬火回火後皆為回火麻田散體組織。
- (2) SUS 420 J2 及 STAVAX ESR 經氣淬後的硬度值分別為  $53.7 \pm 0.1$  和  $52.7 \pm 0.1$  HRC。由回火硬度曲線可看出，SUS 420 J2 及 STAVAX ESR 試片在 480°C 有二次硬化的現象產生。
- (3) STAVAX ESR 的變形量小於 SUS 420 J2 之變形量。
- (4) STAVAX ESR 試片氣淬後經 250°C 回火之極化曲線可觀察到鈍化區 (passive region) 的存在，對於材料的耐腐蝕性有正面的幫助。
- (5) 在 95.9 N 低荷重下 SUS 420 J2 和 STAVAX ESR 磨耗損失量差異不大，但若增加荷重到 120.4 N 即可發現 SUS 420 J2 的質量損失會比 STAVAX ESR 多，可表示 SUS 420 J2 的耐磨特性比 STAVAX ESR 差。
- (6) STAVAX ESR 試片氣淬後經 250°C 回火 3 小時兩次其質量損失量跟 480°C 及 560°C 回火相比是最少所以其耐磨

耗性是最好的。

## 誌謝

感謝金屬工業研究發展中心之編號 A98751Z4 研究計畫案經費補助，使得本實驗可以順利完成。

## 參考文獻

- [1] 黃振賢，(竹內榮一原著)，材料技術人員的磨潤學，金屬熱處理，62(1999) pp.49~54.
- [2] 黃振賢，(竹內榮一原著)，材料技術人員的磨潤學(2)，金屬熱處理，63(1999) pp.66~71.
- [3] 羅宗男，模具鋼經低壓氮化/珠擊複合處理之性質探討，碩士論文(1998)。
- [4] 江朝聰，物理蒸鍍和滲氮處理對鋅壓鑄 H13 熱作模具鋼之影響，碩士論文(2007)。
- [5] Y. T. Xi, D. X. Liu, D. Han, Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature, Surface and Coating Technology, 202 (2008) 2577.
- [6] ASM handbook, Heat Treating of Stainless Steel, American Society for Metals, 4, 9<sup>th</sup> Ed, (1981) pp630~634.
- [7] 鍾松廷、潘思蓉、楊弘華、机薇如、蔡文達\*，熱處理條件對 420 不銹鋼孔蝕敏感性的影響，中華民國防蝕工程學會 98 年度防蝕工程年會暨論文發表會。
- [8] Li-Ho Chiu, Chang-Hui Wu, Heng Chang“Wear behavior of nitrocaburized JIS SKD61 tool steel “, wear, Vol. 253, pp.778-786 ,2002.
- [9] Karl-Erik Thelning, Steel and its heat treatment. pp197~204