

# 離子氮化鋼材之窩蝕特性

黃文濤\*, 陳克昌\*, 何主亮\*,

## A Study on the Cavitation Resistance of Ion Nitrided Steel

W. H. Huang\*, K. C. Chen\*, J. L. He\*,

### 摘要

窩蝕是材料在使用環境中被流體侵蝕而常發生的損壞過程。尋求一種合適的表面改質技術來提昇材料的窩蝕抵抗力，其經濟效益與使用壽命有可能比更換材料更俱優勢。氮化速度較快、硬化層較厚、變形較小且基材選擇彈性大的離子氮化是早被證實提昇金屬耐磨耗、耐腐蝕及耐疲勞最有效的方法之一。因此，本研究之目的在探討碳鋼結構材於離子氮化後之窩蝕行為。而窩蝕試驗依照ASTM G32-85之規範分別在純水、3.5wt% NaCl及3.5wt% HCl水溶液中進行窩蝕試驗。

實驗結果顯示：碳鋼離子氮化後所生成之氮化層在純水中能有效降低窩蝕速率，因離子氮化後所形成的氮化層屬於高硬度組織，能有效抵抗窩蝕所產生的液流衝擊。在3.5wt% NaCl及3.5wt% HCl溶液中因有電化學腐蝕反應的參與，使得氮化層窩蝕抵抗力變差，但在3.5wt% NaCl溶液中仍比未氮化之試片有較低的流失速率。在3.5wt% HCl溶液中電化學腐蝕作用力大於窩蝕機械破壞力，更因為氮化鐵在鹽酸溶液中有較大的腐蝕電流使得氮化層失去保護作用，導致窩蝕損失大於碳鋼原材。由此可知，表面改質必須特別針對使用環境加以選擇，普通碳鋼離子氮化後在純水和3.5wt% NaCl中可有效抵抗窩蝕作用。

關鍵詞：離子氮化、窩蝕。

### Abstract

Cavitation is a common deterioration process of a material resulting from high speed fluid attack. Surface treatments are usually preferably considered to promote cavitation resistance because economic reason and longer durability. Ion nitriding, known to have a higher nitriding rate, larger case depth, less distortion of work piece as well as flexibility in substrate material, is the most effective process for the nitriding of metals to improve their wear, corrosion and fatigue resistance. Hence, the cavitation behavior of ion nitrided carbon steel will be studied. An ASTM G32-85 standard method was conducted to proceed cavitation test in fresh water, 3.5wt% NaCl, and 3.5wt% HCl, respectively.

Experimental results show that nitriding of steel reduces cavitation rate in fresh water. This indicates that surface hardening caused by ion nitriding is the reason to resist mechanical damage. Electrochemical corrosion plays a part in the case of 3.5wt% NaCl and 3.5wt% HCl solution. Ion nitrided specimens in the former solution therefore become less protective than in fresh water with however lower cavitation rate than blank steel. Ion nitrided specimen in the later solution subjecting primarily to electrochemical attack to the nitriding layer, which has high corrosion current, shows inferior cavitation resistance than blank substrate. We learned from this study that method of surface modification should be properly determined depending on the electrolyte used. Ion nitriding of carbon steel in our case is suitable for fresh water and 3.5wt% NaCl, but not for 3.5wt% HCl.

Key words: Ion Nitriding, Cavitation

\*逢甲大學材料科學系

Department of Materials Science, Feng Chia University.

## 1. 前言

現今的機械材料使用環境日益嚴苛，特別是與流體直接接觸的元件。如果流體以高速運動通過元件表面，很可能造成窩蝕(Cavitation)。對於船用螺旋槳、渦輪葉片、幫浦葉片、超音波元件及其他被高速流過表面和壓力變化極大的管路等設備與機具，常因窩蝕之損傷而導致失去功能。

窩蝕的現象是液體中的氣泡在臨近固體表面破碎時造成材料逐漸流失的過程 [1]。當液體中的氣泡破碎時，環繞在氣泡周圍的液體伺機向破碎的氣泡奔馳，產生之衝擊液流足以造成材料表面產生破裂或塑性變形。

而氣泡主要是產生於表面凹陷不平整處，因為此處容易產生壓力差而成爲形成氣泡的有利位置。機械元件在液體窩蝕損害的作用下，對材料所產生的損傷方式如圖1所示 [2]。當壓力劇減時氣泡在材料表面生成，而後氣泡消失使液流對脆性材料造成材料流失，如圖中(a)所示。若對延性材料則產生塑性變形，如圖中(b)所示，當新的氣泡在原地生成並破損使底層材料顯露出來，重複以上步驟則會使窩蝕損毀地點呈現深孔。

窩蝕的改善方式可分別由機械設計、材料選擇及表面工程等方面去著手。機械設計方面，元件幾何設計及流體動力學的介入皆可適當減低窩蝕的傷害，例如在管線設計上，儘可能將直角的管線改採爲較平滑的設計，如此即可降低窩蝕所產生的傷害。材料選擇方面，在環境無法變動的情況下，這項議題就變得十分重要了。一般認爲如果沒有腐蝕媒介的存在，則具有高疊差能(High stacking fault energy)的金屬，伴隨產生的平面易滑移特性(Planar slip)和高加工硬化率(Work hardenability)者能抵抗窩蝕所帶來的機械沖擊。應力誘發相變的金屬也具有高度的抵抗性 [3-5]。具備此種特性的金屬如錳鋼、特定成份的不銹鋼和青銅。Piltz亦曾針對材料物性對於抗窩蝕的影響做過相關的研究 [6]，其中發現材料硬度值是影響抗窩蝕性的重要因素之一，據此，離子氮化後表面硬度的提昇相信能對於抵抗窩蝕帶來正面效應。如果週遭環境有腐蝕媒介，則除了機械性質需滿足上述要求之外，更需具有電化學上的鈍性。若干高分子和陶瓷

是能克服此種環境的候選材料，但前者的有機本質和後者脆性不易加工的特質阻礙其應用性，在這種情形之下，往表面工程方向去尋找解決之道就成爲一個重要課題了。

表面工程方面，有被覆和改質兩大領域可供選擇，前者之相關研究顯示了若干的可行性 [7-11]，例如在鋼材上爆鍍一層TiNi則可相對於304L不銹鋼具有較佳的抗窩蝕特性 [9]，但爆鍍技術僅能在平整的表面上才能進行，對於凹洞或內管則無法處理，因此無形中對於爆鍍技術的應用就受到了莫大的限制。此外被覆層與基材之附著性、深孔處理能力、幾何形狀限制、適用性、處理容易、成本低廉及效果優越更需同時考量，而離子氮化正是具有以上優點之表面改質方法。

離子氮化法被公認是提昇金屬氮化後之耐磨耗、耐腐蝕及耐疲勞最有效的方法，其中Chyou [12,15]曾針對發電設備SAE 4140之針閥元件進行離子氮化，發現使用壽命獲得提昇，作者相信氮化層的高剛性與硬度是抵抗窩蝕的首因，並評比了鹽水中未氮化與氮化後之SAE 4140的E-pH圖，發現離子氮化SAE 4140的鈍態區相對擴大，顯示氮化層亦有助於鹽水中抗蝕性之提昇。這引發更進一步擴大探討窩蝕溶液之動機。Zhou [13]等人亦曾對鈦系金屬進行離子氮化並探討其在純水中窩蝕抵抗性，發現化合物層會縮短窩蝕潛伏期，造成負面影響，只有在適當的氮化條件下，例如720°C下氮化8小時，脆性TiN化合物層不會在表面生成，而使得其潛伏期比未氮化處理高出1.6倍。然而不同窩蝕溶液中的行爲又是如何，是十分有趣的議題，因此本研究之目的在探討碳鋼進行離子氮化後再施以不同溶液的窩蝕試驗，藉以釐清在不同溶液窩蝕後氮化層在窩蝕抵抗性中所扮演的角色。

## 2. 實驗方法

先將S48C碳鋼基材加工成螺絲狀，並研磨拋光至鏡面，以供後續窩蝕試驗用，見圖2所示。碳鋼基材的成份如表1所示。試片分成三組，分別爲碳鋼原材、調質(Quench-and-tempered)及調質後離子氮化等三組，其中調質係將碳鋼原材進行真空淬火及回火至

回火至試片表面硬度達HRC 45，爾後利用這三組試片進行窩蝕試驗。離子氮化設備為一自行組裝之系統，其爐體結構及裝置如圖3所示，氮化條件如表2所示。

利用維氏硬度機(Akashi MVK-H11)分別對每塊試片測試五點後求取平均值，荷重50g。窩蝕試驗依ASTM G32-85 [ 14 ] 進行，試驗機廠牌及型號為Branson之Sonifier 450，其外觀如圖4所示，輸出頻率為20 kHz、振幅為50  $\mu$  m。試驗時將螺絲狀試片緊鎖在超音波振盪頭的母牙處，分別在不同電解質的環境下，即純水、3.5 wt % NaCl及3.5 wt % HCl中，測試時間分別為30、60、90及120分鐘四個階段，每階段取下以四位數之電子式天秤量測重量損失。在本研究中因所測試的環境包含有鹽水及鹽酸等具有腐蝕性的環境，為了解在腐蝕環境下腐蝕作用對於材料的影響，所以試片分別在3.5wt % NaCl及3.5wt % HCl溶液進行循環極化試驗。恆電位儀的機型為EG&G Instruments之Potentiostat/Galvanostat Model 263A，碳棒為輔助電極，飽和甘汞電極作為參考電極，待測的試片則作為工作電極。

利用X-Ray繞射儀分析氮化層在試驗前後表面結構變化情形，以判定在窩蝕過程中，由何種晶相結構造成抵抗窩蝕的結果。以SEM觀察窩蝕試驗後之表面狀態及截面狀態。使用EPMA來分析元素分佈。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 氮化試片之微觀組織

圖5顯示碳鋼原材及碳鋼經氮化後之X-ray繞射圖，在圖中可看到碳鋼在離子氮化前只有 $\alpha$ -Fe的繞射峰，而在經離子氮化後則分別出現了 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N的繞射峰。

圖6(a)為氮化試片截面金相，圖中可見到一層約6  $\mu$  m的明亮表層，這層明亮的表層即為化合物層，佐以圖5(a)的XRD結果可知此化合物層主要為 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N所構成，但在截面金相中並不易分辨出氮化後所生成之擴散層的分界，因此利用EPMA的Line scan分析氮元素分佈，經由圖6(b)的分析結果可看出氮濃度在接近表面的位置有一最高值，

隨後氮濃度往基材內部方向遞減，到了離基材表面約20  $\mu$  m處氮濃度則無明顯的改變，因此研判經離子氮化後所生成的化合物層及擴散層總厚度約為20  $\mu$  m。表3則為碳鋼試片及其調質處理和氮化處理後的硬度值變化，表中可知試片在離子氮化後硬度值有明顯的增加，而此硬度的升高即為表面生成 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N相及在基材中固溶氮原子所造成的。以上結果確認所得之氮化組織為由表層往心部分別獲得 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N及擴散層的典型組織。

#### 3.2 純水中之窩蝕結果

試片在純水中經不同窩蝕時間後的累積重量損失如圖7所示。在圖中可發現氮化試片相較於其餘兩組在純水中有較佳的窩蝕抵抗性。該圖並顯示窩蝕初期氮化試片較調質試片有較大的重量損失，原因在氮化試片表面局部的 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N硬脆化合物層優先脫落，這一點與Zhou的觀察吻合 [ 13 ]，不過隨著窩蝕時間的增加，氮化試片的重量損失幾乎持平，這段時間試片表面組織發生的變化可參考圖8。圖8(c)、(d)、(e)及(f)則分別為經不同窩蝕時間後的XRD繞射圖，由圖可發現，經不同的窩蝕時間後其 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N相繞射峰逐漸減弱，而且隨著窩蝕時間的增加，逐漸顯現出碳鋼基材 $\alpha$ -Fe的繞射峰，由此可知在純水中的窩蝕機構 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N扮演關鍵的角色，即 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N在窩蝕過程中提供材料表面所需的高硬度，利用這層高硬度的化合物層來抵抗因窩蝕所產生的衝擊力，使試片較不易流失。

此外比較圖8(b)、(c)及(f)可看到氮化試片隨著窩蝕時間增加而使化合物層的厚度逐漸變薄，圖中亦可發現試片表面無明顯的破損產生，甚至經120min窩蝕後表面仍殘存化合物層，此結果說明了碳鋼試片在經過離子氮化處理後於純水中因有氮化表面層的保護而提升抗窩蝕能力。

再觀察碳鋼原材試片如圖8(a)可看到試片表面已顯露出晶粒特徵及波來鐵層狀組織，這說明試片已脫離窩蝕潛伏期進入後段的窩蝕成長期。另一項值得注意的是圖7中，相對於碳鋼原材，經調質後的試片在抗窩蝕能力上亦有不錯的表現，因調質後的試片較碳

鋼原材在硬度上有顯著的提高，因此也就使其在抗窩蝕能力上有較好的表現。

綜合以上，氮化層在純水的窩蝕過程中發揮保護的作用，初期較大的重量損失來自於局部  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N 及  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N 化合物層脫落，後期則大部份由殘餘化合物層及固溶層抵抗。

### 3.3 鹽水中之窩蝕結果

試片在3.5wt% NaCl中經不同窩蝕時間後的累積重量損失如圖9所示。和圖7作比較，可知各組試片在3.5wt% NaCl中其重量損失較純水大，碳鋼原材損失量約為純水中的兩倍。但整體來看氮化處理後的試片有較佳的抗窩蝕能力，相信是在鹽水中，氮化層在某種程度上伴隨鈍化的作用，阻礙鐵離子釋出。此外在3.5wt% NaCl中比在純水中之重量損失來的高，原因在於此環境中還包含了電化學腐蝕的存在，造成整體的累積重量損失有明顯的增加。另外值得一提的是調質碳鋼的窩蝕抵抗力亦優於碳鋼原材，原因在於調質後的試片有較高的表面硬度，以及鐵、碳元素分佈均質化的作用下幫助抵抗窩蝕攻擊，所以有較好的抗窩蝕能力。至於碳鋼原材，其蝕孔過程可能受到波來鐵及肥粒鐵兩相共存的關係，腐蝕電位較低的肥粒鐵成為攻擊起始點，因而裸露出波來鐵層狀組織，如圖10(a)所示，造成大量的材料流失。

窩蝕後之XRD分析如圖10所示。圖中可發現隨著窩蝕時間的增加， $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N化合物強度逐漸減弱，伴隨著碳鋼基材繞射峰強度逐漸增加，此一過程與碳鋼在純水中窩蝕後的XRD繞射結果相同。

由圖10(f)截面組織可看到氮化試片的化合物層經120min窩蝕後已有局部被吃穿之情形，但表面仍依稀可發現化合物層殘留，表示化合物層在3.5wt% NaCl的環境下仍能發揮其抗窩蝕的功效，即藉由表面高硬度的化合物層來抵抗窩蝕所產生的機械應力，並藉由此化合物層的鈍化作用來抵抗腐蝕環境所產生的電化學侵蝕。

鑑於氮化試片和原材試片在3.5wt% NaCl中窩蝕速率的巨大差異，為了解電化學腐蝕流失所占有的分量，將試片在3.5wt% NaCl中進行直流極化試驗，圖

11中可看到碳鋼原材、調質碳鋼及氮化碳鋼之腐蝕電位與腐蝕電流值幾乎是一致的，唯氮化碳鋼略成鈍化現象，此一結果和Chyou所提之E-pH圖形為模式一致[15]，氮化層有助於擴大鋼材鈍化區。同時，氮離子從氮化層裂隙溶出時，停留在裂隙生成NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，也有助於抑制針孔的擴大。因此可知鹽水中的氮化碳鋼對窩蝕的保護效果一方面在於窩蝕機械作用力的抵抗，一方面在陽極區間，離子氮化碳鋼的鈍化行為對於鐵離子的釋出應有某種程度的抑制效果。

### 3.4 鹽酸中之窩蝕結果試

試片在3.5wt% HCl中經不同窩蝕時間後的累積重量損失如圖12所示。除了各試片重量損失明顯增加外，與先前各試片在純水及3.5wt% NaCl中所獲得的累積重量損失順序完全相反。氮化試片有最大的重量損失，吾人相信在3.5wt% HCl中腐蝕分量必定具有關鍵的影響地位。

試片在此一窩蝕環境中的表面硬度與抗窩蝕行為已無相互關係，此亦可由圖12得知，因經調質後與未經任何處理的試片在經120min窩蝕後其重量損失相差不大，均約為80mg，所以在3.5wt% HCl溶液中機械作用力已不是窩蝕流失的主要因素。

在3.5wt% HCl中窩蝕後之XRD分析如圖13所示。圖中可發現經氮化試片在窩蝕30min後即出現顯著的 $\alpha$ -Fe(110)繞射峰，而且 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N化合物相已消失殆盡，表示在窩蝕的初期 $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N及 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N早已破損剝落，由此即可推斷化合物層在3.5wt% HCl的使用環境下並無法有效的抵抗窩蝕侵襲。

比較圖13不同的窩蝕時間的截面金相顯微照片，圖中發現經30min窩蝕後化合物層已完全消失，而且在試片表面可發現許多深達基材的蝕孔出現，隨著窩蝕時間的增加試片表面更形粗糙，並且蝕孔變得愈深愈大，造成基材的大量流失。觀察表面形態，表面粗度亦明顯的要比之前在純水與3.5wt% NaCl中的要高。

氮化試片在3.5wt% HCl中之所以呈現比原材差的理由可以由圖14直流極化曲線得知，氮化試片有更低的腐蝕電位與較高的腐蝕電流，且呈現不完美的鈍化現象，若遭受到窩蝕液流的侵襲，除了氮化層比原

材更容易流失之外，基材亦顯露於腐蝕環境中，則會因伽凡尼腐蝕而加速基材的腐蝕，降低材料在此環境中的抗窩蝕能力。以上可知鋼材的氮化製程不適用於所有的窩蝕環境，在純水及鹽水中，主要來自於機械力的破壞，氮化層得以發揮保護作用。在鹽酸環境中則適得其反。

#### 4. 結論

本研究以離子氮化法對碳鋼基材進行表面改質處理，針對在三溶液中進行窩蝕試驗，得出以下結論：

碳鋼離子氮化後所生成之氮化層在純水或中性環境如NaCl水溶液中能有效降低窩蝕速率，因離子氮化後所形成的氮化層屬於高硬度組織，在此能有效抵抗窩蝕所產生的液流衝擊。在3.5wt% HCl溶液中因有電化學腐蝕反應的參與，因而氮化層窩蝕抵抗性變差，電化學腐蝕作用力大於窩蝕機械破壞力，更因為氮化鐵在鹽酸溶液中有較大的腐蝕電流使得氮化層失去保護作用，甚至窩蝕損失大於碳鋼原材。本研究說明了離子氮化鋼材未能一體適用於所有窩蝕環境。

#### 誌謝

本文作者感謝國科會計畫NSC 89-2216-E-035-021經費支持，使本研究得以順利完成。

#### 參考文獻

1. K. G. Budinski, in Surface Engineering for Wear Resistance (Prentice-Hall, Inc., New York, 1988), p. 24.
2. M. G. Fontana and N. D. Greene, in Corrosion Engineering (McGraw-Hill Book Company, New York, 1978), p. 85.
3. D. A. Woodford, Metall. Trans., 3 (1972) 1137.
4. B. C. S. Rao and D. H. Buckley, Mater. Sci. Eng., 67 (1984) 55.
5. A. Karimi and J. L. Martin, Int. Metall. Rev., 30, 1 (1986) 1.
6. H. H. Piltz Dissertation, TH Darmstadt, (1963).

7. S. Munsterer and K. Kohlhof, "Covitation Proteion by Low Temperature Tign Coatings", Surface and Coatings Technology, 74-75(1995)642+647.
8. K. S. Zhou, D. Z. Wang, and M. Liu, Surf. Coat. Technol., 34 (1987) 79.
9. R. H. Richman, A. S. Rao, and D. Kung, Wear 181-183 (1995) 80.
10. J.L. He, K. W. Won, C. T. Chang, K. C. Chen and H. C. Lin, Wear, 233-235 (1999) 104.
11. 張景棠、何主亮，防蝕工程，出版中。
12. 邱善得，防蝕工程，第九卷第三期，84年9月，181-191。
13. K. S. Zhou and H. Herman, Wear 80 (1982) 101.
14. Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test, ASTM G32-85.
15. S. D. Chyou and H. C. Shih, Corrosion, 47, 1 (1991)

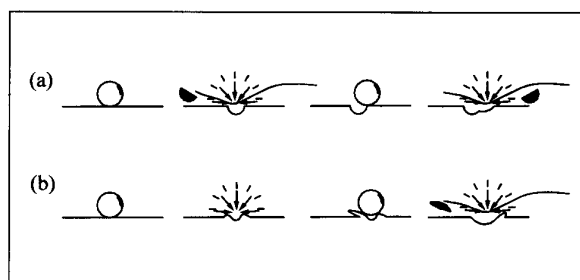


圖 1 純機械作用力下的窩蝕損害示意圖 [ 2 ]，圖(a)為脆性材料的破壞過程，圖(b)為塑性材料的破壞過程。

Fig . 1 Schematic diagram of a cavitation sequence for(a) brittle materials and(b) ductile materials.

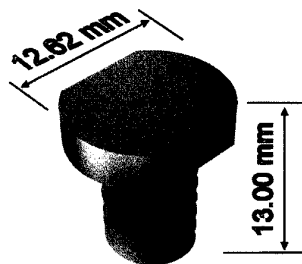


圖 2 本實驗所使用之試片尺寸示意圖。  
Fig . 2 A schematic appearance of specimen with size labeled.

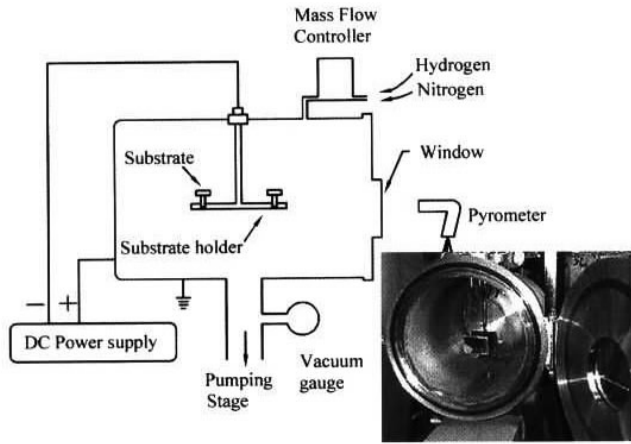


圖3 離子氮化設備配置圖。

Fig. 3 Schematic ion nitriding equipment.

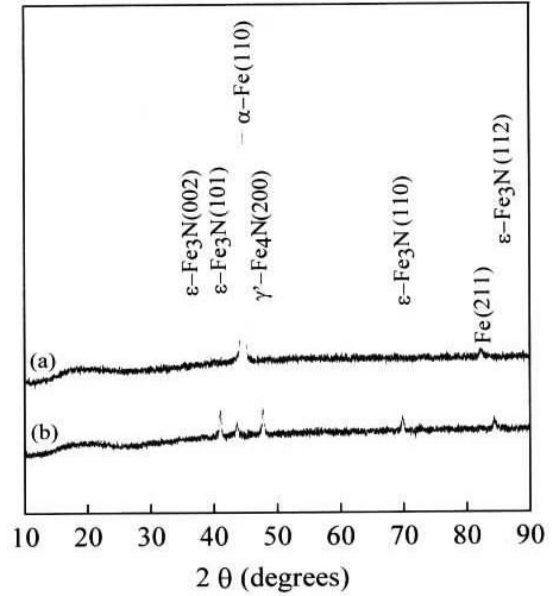


圖 5 (a)碳鋼原材及(b)碳鋼經離子氮化後的XRD繞射圖。

Fig. 5 XRD patterns of (a) S48C and (b) ion nitrided S48C

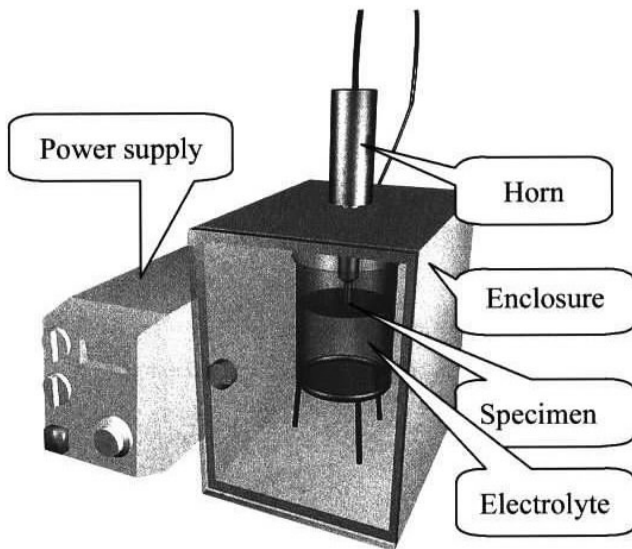


圖4 窩蝕試驗機外觀。

Fig. 4 Schematic cavitation equipment

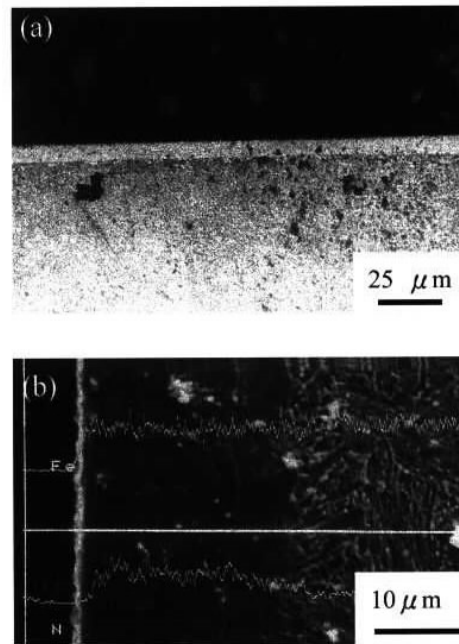


圖 6 試片經離子氮化後之(a)截面金相 (b)EPMA之 Line scan分析。

Fig. 6 (a) Metallograph and (b) electron micrograph with line scanning of cross section of nitrided specimen

離子氮化鋼材之窩蝕特性

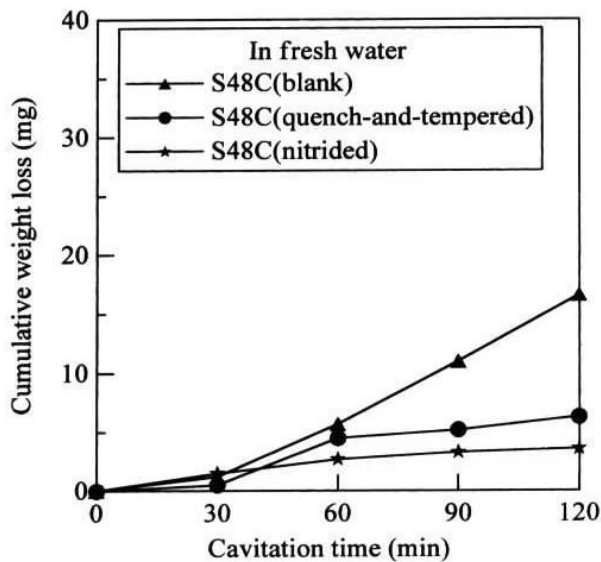


圖 7 在純水中經不同窩蝕時間後的累積重量損失。  
Fig. 7 Cumulative weight loss of specimens cavitated in fresh water

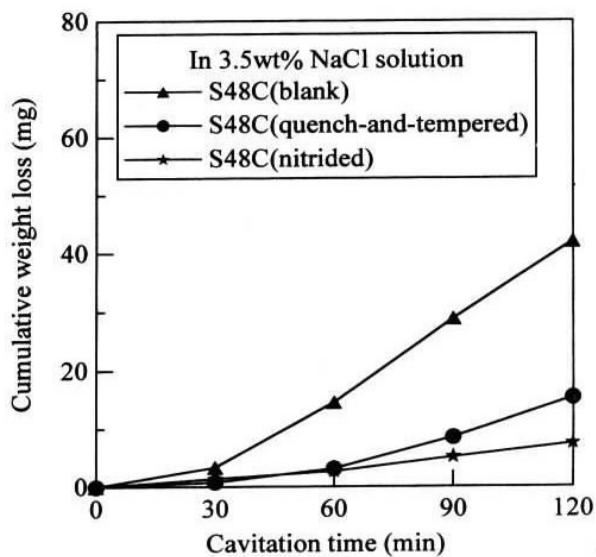


圖 9 在3.5wt% NaCl中經不同窩蝕時間後的累積重量損失。  
Fig. 9 Cumulative weight loss of specimens cavitated in 3.5wt% NaCl solution

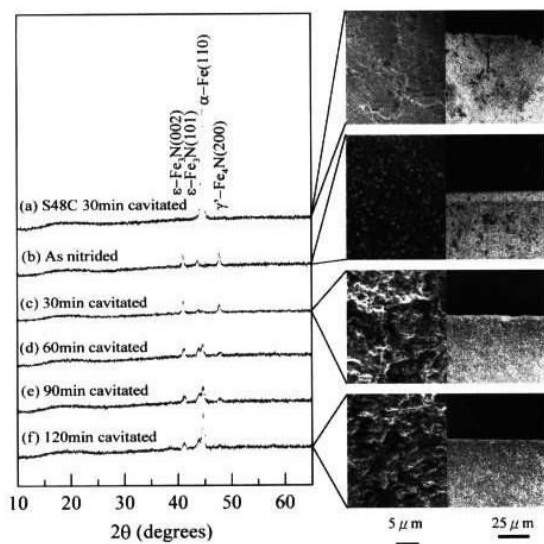


圖 8 (a)碳鋼原材 (b)氮化碳鋼 (c)氮化碳鋼於純水中窩蝕 30 min (d) 60 min (e) 90 min (f) 120 min 之 XRD 繞射圖，以及各試片的窩蝕表面及截面。  
Fig. 8 XRD patterns of (a) S48C cavitated 30min (b) as nitrided (c) nitrided and cavitated 30min (d) 60min (e) 90min (f) 120min in fresh water

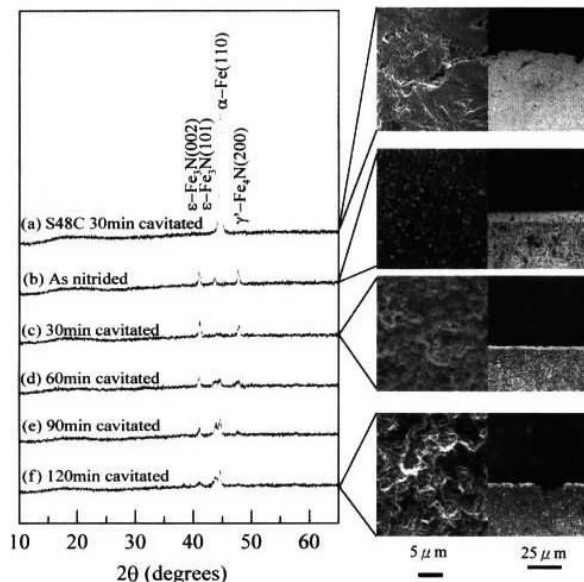


圖 10 (a)碳鋼原材 (b)氮化碳鋼 (c)氮化碳鋼於 3.5wt% NaCl 中窩蝕 30min (d) 60min (e) 90min (f) 120min 之 XRD 繞射圖，以及各試片的窩蝕表面及截面。  
Fig. 10 XRD patterns of (a) S48C cavitated 30min (b) as nitrided (c) nitrided and cavitated 30min (d) 60min (e) 90min (f) 120min 3.5wt% NaCl solution

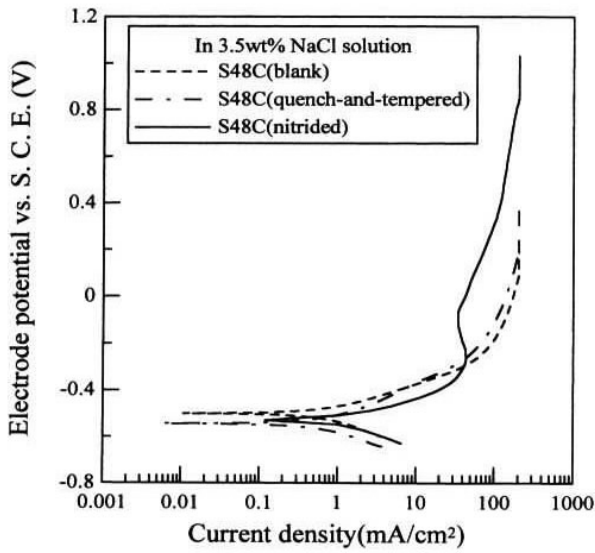


圖11 經不同處理之碳鋼試片於3.5wt% NaCl溶液中的直流極化曲線圖。

Fig. 11 Polarization curves of specimens tested in 3.5wt% NaCl solution

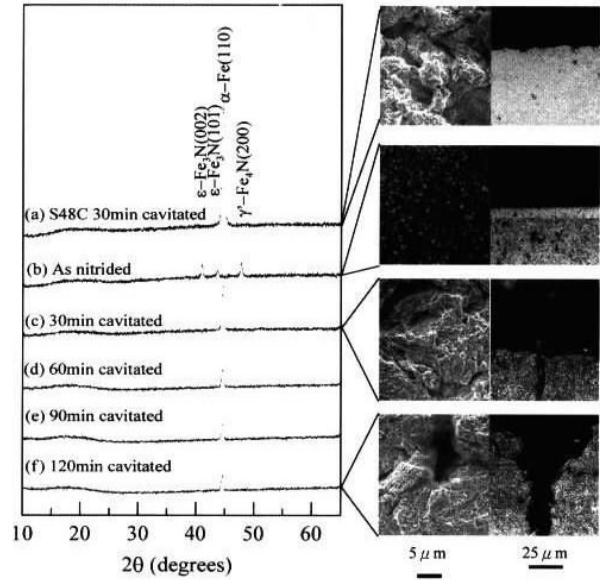


圖13 (a)碳鋼原材 (b)氮化碳鋼 (c)氮化碳鋼於3.5wt% HCl中窩蝕30min (d)60min (e) 90min (f) 120min之XRD繞射圖，以及各試片的窩蝕表面及截面。

Fig. 13 XRD patterns of (a) S48C cavitated 30 min (b) as nitrided (c) nitrided and cavitated 30 min (d) 60 min (e) 90 min (f) 120 min in 3.5wt% HCl solution

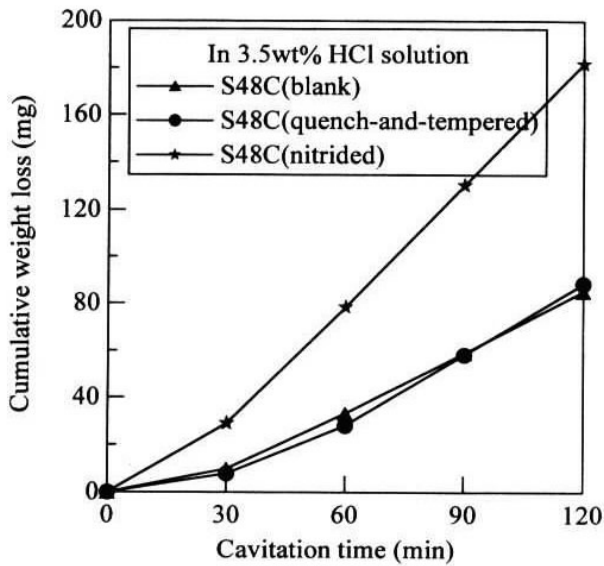


圖12 在3.5wt% HCl中經不同窩蝕時間後的累積重量損失。

Fig. 12 Cumulative weight loss of specimens cavitated in 3.5wt% HCl solution

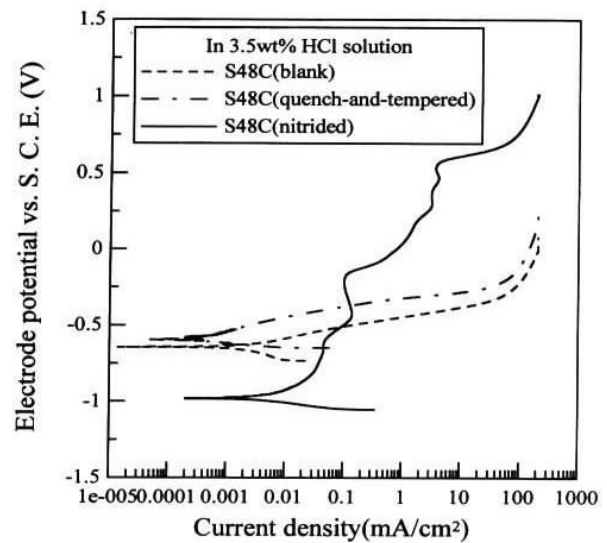


圖14 經不同處理之碳鋼試片於3.5wt% HCl溶液中的直流極化曲線圖。

Fig. 14 Polarization curves of specimens tested in 3.5wt% HCl solution



## 離子氮化鋼材之窩蝕特性

表1 本實驗碳鋼之主要成份

Table 1 Chemical composition of S48C carbon steel

成份(wt%)	C	Mn	Si	Cr	Mo	Fe
S48C中碳鋼	0.48	< 0.90	< 0.20	< 0.45	< 0.13	Bal.

表3 碳鋼試片經不同處理後的平均硬度值

Table 3 Average surface hardness of the S45C, conditioned specimen and ion nitrided specimen.

材質	Hardness (Hv 0.05Kg)
S48C原材	265
S48C調質後	467
S48C氮化後	642

表2 離子氮化之條件(\*sccm : Standard Cubic Centimeter per Minute)

Table 2 Ion nitriding conditions used in this study (\*sccm : Standard Cubic Centimeter per Minute) .

氮化溫度	550°C
氮化時間	1.5 h
總氣體流量	40 sccm*
氫含量	40.0 %
氮含量	60.0 %
工作壓力	5.0 Torr
工作電壓	700 V
工作電流	0.45 A