

不同水媒環境下之AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞行爲

藍一龍、林志光*

Fatigue Behavior of AISI 347 Stainless Steel in Various Aqueous Environments

I. L. Lan and C. K. Lin*

摘 要

本研究主旨在探討不同環境參數對 AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞性質之影響。實驗結果顯示，AISI 347不銹鋼在空氣及五種水溶液中之高週疲勞行爲以 H_2SO_4 水溶液及 3.5% NaCl 中有較明顯之影響，在此兩種環境中的高週疲勞壽命，皆有明顯降低現象，其中又以 H_2SO_4 水溶液中的降幅最大，而室溫純水、80°C 純水及 3.5% NaCl 加抑制劑中之高週疲勞壽命與空氣中之差異則不顯著。而在疲勞裂縫成長實驗(Stage II)顯示：空氣中及五種水溶液中之裂縫成長速率差異不大。由此結果得知高週疲勞壽命主要消耗在裂縫起始階段，而不在裂縫延伸階段。

H_2SO_4 水溶液及 3.5% NaCl 對 347 不銹鋼高週疲勞壽命主要的影響皆在於裂縫起始及短裂縫成長 (Stage I) 階段。3.5% NaCl 水溶液主要的影響，在於氯離子使試棒表面形成蝕孔造成應力集中效應，而縮短了裂縫起始所需的時間，而 H_2SO_4 水溶液的影響在於降低 pH 值加劇了循環應力與腐蝕環境的加成作用，並分解具保護作用的鈍化膜，進而促使短裂縫之生長，並加速短裂縫通過過渡區進入長裂縫階段，縮短裂縫起始所需時間，因此整體疲勞壽命有最明顯之下降。此外，在 3.5% NaCl 水溶液中添加抑制劑，可以抑制蝕孔生成於平滑試棒表面，防止裂縫由蝕孔處生成，因而明顯提升了高週疲勞壽命，而抑制劑對於金屬表面的吸附作用亦可隔絕腐蝕環境的影響，減少腐蝕作用的程度。

關鍵詞：AISI 347 不銹鋼；腐蝕疲勞；疲勞裂縫成長。

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the influence of environmental factors, including pH value, temperature, chloride, and pitting inhibitor, on the corrosion fatigue properties of AISI 347 stainless steel. Results showed that the fatigue strength of AISI 347 in H_2SO_4 and 3.5% NaCl

with inhibitor; especially fatigue strength in H_2SO_4 was the lowest. However, the FCG rates in all environments were almost the same. These results indicated that the initial fatigue cracking stage controlled the HCF life of AISI 347.

The H_2SO_4 and 3.5% NaCl solutions had more detrimental effects on the HCF of AISI 347 in crack initiation and Stage I cracking stages as compared with other aqueous environments. The fatigue-strength reduction in 3.5% NaCl solution resulted from the formation of corrosion pits as the stress concentrations for premature fatigue crack initiation. The lower pH value in H_2SO_4 would dissolve the protective passive surface film and enhance the synergism between corrosive environment and cyclic stresses leading to the shorter fatigue life by reducing the periods of Stage I cracking and transition from Stage I to Stage II cracking. Adding pitting inhibitor in 3.5% NaCl solution can prevent formation of corrosion pits on specimen surface and extend HCF life. This is due to the fact that the inhibitor added in 3.5% NaCl solution can prevent pitting formation by reacting with the metal ions to form a protective film on specimen surface.

Keywords: AISI 347 stainless steel; corrosin fatigue; fatigue crack growth.

一、前言

鎳鉻系沃斯田鐵基不銹鋼由於具有適當的強度、延韌性、良好的加工性、焊接性與耐蝕性，因此廣泛用於各種工程結構與組件上。300 系列不銹鋼為美國所生產的不銹鋼中種類最多者^[1]。在300系列不銹鋼中，AISI 304 不銹鋼是最典型也是最被廣泛使用的材質，然而 304 不銹鋼在溫度介於 400 至 850°C 時，容易於晶界析出含鉻之碳化物，因此在晶界附近的耐蝕性會因為鉻含量的減少而降低，而此狀態下的沃斯田鐵系不銹鋼即稱之為敏化 (sensitizing)，因而使晶界易受腐蝕環境的侵蝕，發生所謂的沿晶腐蝕 (intergranular corrosion)，較易發生沿晶應力腐蝕破裂 (IGSCC, intergranular stress corrosion cracking)^[2]。

為了改善上述敏化所造成的抗蝕能力降低的現象，改良型的沃斯田鐵系 347 不銹鋼是以添加鈮及鉭的方式，並在 900 至 925°C 之間的溫度進行安定化熱處理，以確保鈮或鉭的碳化物有最大量的析出，使其在較高的溫度下析出鈮或鉭的碳化物，以降低冷卻過程中在晶界上析出富鉻碳化物的機會，藉此達成安定化的效果^[1]。由於這種改良型不銹鋼具有較佳之抗沿晶腐蝕能力及中溫強度，因此主要應用在須長期暴露在 600°C 以下溫度的場合^[3]，例如

核電廠的冷卻水幫 (reactor coolant pump, RCP) 主軸、冷卻水管、爐心側管 (core shroud) 等等^[4]。

然而 347 不銹鋼雖具較佳之抗 IGSCC 的能力，但在電廠的某些實際運轉應用中，由於受力狀態是動態循環負荷 (如 RCP 的主軸)，加上冷卻水中存在的一些雜質，會因腐蝕疲勞及應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracking, SCC) 的作用而導致失效，造成使用壽命之減少，其破損模式很可能會由沿晶走向的 SCC 轉變成穿晶走向的疲勞斷裂。這種藉由腐蝕環境的作用，加速了裂縫生成與延伸之過程，是謂環境誘致破裂 (environmentally assisted cracking)。因此，對 AISI 347 不銹鋼的腐蝕疲勞性質做深入的探討，將有助於評估該等材料所製之構件的疲勞壽命。

現今有關沃斯田鐵系不銹鋼疲勞性質的研究大多數都以 304、316 為研究對象，347 不銹鋼由於通常被使用於較特殊的場合，自然針對其疲勞性質做探討的文獻也就少的多。為了評估 347 不銹鋼結構件的使用壽命時，能有更具體的研究數據作為參考，本研究乃在空氣中及不同溫度、酸鹼值及離子水媒環境中，對 347 不銹鋼各進行高週疲勞試驗及疲勞裂縫延伸試驗，以分別建立應力-壽命 (S-N) 曲線及疲勞裂縫成長速率 (da/dN- ΔK) 曲線。藉由這兩種疲勞試驗數據的比較，加上以電化學阻抗分析

儀，所得之各水媒環境中之電化學性質的輔助，以及電子顯微鏡所作的破斷面分析，探討 347 不銹鋼在動態循環受力下耐久性質劣化的成因。

二、實驗方法

1. 材料及試片製作

本研究所使用的材料為 Carpenter 公司所生產，由廠商以經過固溶處理的圓棒提供，其成份如 Table 1 所示，依照 ASTM E466^[5] 及 ASTM E647^[6] 之規範製作成高週疲勞軸向試棒及 CT 裂縫成長試片，試片尺寸同參考文獻^[7]。由於本研究的材料具有加工硬化的特點，為避免實驗時之機械性質與原本出入太大，因此試棒在經過粗加工之後，再施以退火熱處理以消除常溫加工所造成之硬化現象，隨後再進行輕微的細加工及拋光，以達到所需試棒的尺寸要求。退火熱處理條件為置於 1050°C 空氣爐中 1 小時後水淬，退火後材料之機械性質如 Table 2 所示。

2. 實驗環境

本實驗採用六種環境對實驗材料進行試驗，計有室溫空氣、純水 (pH = 6.3)、3.5% NaCl (pH = 6.1)、3.5% NaCl + 孔蝕抑制劑 (pH = 11.1)、pH = 3 的硫酸 (H₂SO₄, 50 ppm) 及 80°C 純水 (pH = 6.3)，而其中 pH = 3 之環境目的為模擬實際環境中常發生的局部酸化之情形^[8]。另外，鹽水添加孔蝕抑制劑 (3000 ppm 的 Methoxypropylamine, MPA) 的環境是為了與鹽水環境作對照，藉以比較蝕孔對整體疲勞壽命的影響程度。

3. 疲勞試驗

軸向疲勞試驗依 ASTM E466^[5] 規定之流程，使用 MTS 810 動態材料試驗機，受力條件為應力比 R = 0.1，頻率為 5 Hz 之正弦波，在不同的應力振幅下測試，直到試棒破斷為止，得到應力振幅值 (S) 和循環次數 (N) 之間的關係，並以 10⁶ 循環數為實驗

終止的循環數。疲勞裂縫成長試驗則依 ASTM E647^[6] 規定之流程，使用 MTS 810 動態材料試驗機，疲勞裂縫成長試驗主要分成兩個步驟進行，首先為疲勞預裂，再進行裂縫延伸。疲勞預裂以 R = 0.1，20 Hz 之正弦波於空氣中進行疲勞預裂，裂縫成長則改以 5 Hz 於腐蝕環境中進行，並使用裂縫開口位移量規 (COD gage) 量測裂縫長度及裂縫閉合程度。腐蝕環境中之疲勞實驗裝置和參考文獻^[7] 中相同。

4. 電化學試驗

使用慢速切割機切下軸向疲勞破壞試棒之端部，將銅線與試片的一端焊接，以環氧樹脂冷鑲埋，試片與環境之接觸面積為 1.13 cm²，再利用自動研磨機研磨 (#240 砂紙 → #320 砂紙 → #600 砂紙 → #800 砂紙 → #1000 砂紙)，隨即以高純度酒精做超音波清洗表面附著的雜質，經烘乾後，放入腐蝕溶液中進行電化學量測實驗。以接有銅導線之待測試片為工作電極，飽合甘汞電極 (SCE) 為參考電極，白金絲 (Pt) 為輔助電極，採用 EG & G Model 6310 電化學阻抗分析儀並藉由 EG & G M398 分析軟體控制，進行開路電位監測、循環陽極動態極化掃描及 Tafel 極化曲線掃描等實驗。

5. 疲勞破斷面觀察

將壽命較長低應力破壞的軸向疲勞試棒，使用慢速切割機切下其破斷面，以高純度酒精做超音波清洗表面附著的雜質，然後將表面鍍金，使用電子顯微鏡 (SEM) 觀察其疲勞破壞的模式。

三、結果與討論

1. 電化學試驗

Table 3 及 Fig. 1 分別為 AISI 347 不銹鋼在不同環境中之相關電化學數據列表及陽極極化曲線圖，由此可發現 347 不銹鋼在室溫純水環境中具有相當明顯之鈍化反應，其次為 80°C 純水及 pH = 3 的

H₂SO₄ 溶液中，而在 3.5% NaCl 中的鈍化區則明顯縮小。但須注意的是，3.5% NaCl 在添加了 MPA 孔蝕抑制劑之後，鈍化區明顯變大了，甚至已達接近室溫純水的程度。另外，在腐蝕速率方面，由 Table 3 可看出，80°C 純水及 pH = 3 的 H₂SO₄ 溶液中的腐蝕電流最大，其次為 3.5% NaCl 及室溫純水，而添加抑制劑的 3.5% NaCl 腐蝕電流最小，不及 3.5% NaCl 腐蝕電流的五分之一。

總體來看，由 Table 3 可歸納出，所有環境中以 H₂SO₄ 溶液與 80°C 純水的腐蝕傾向最為強烈，兩者之腐蝕電位最低，腐蝕電流為最大，而 3.5% NaCl 的腐蝕電流雖不大，但其孔蝕電位最低，孔蝕傾向最明顯。至於最具保護性的環境就屬添加抑制劑的水溶液了，不但達成其抑制孔蝕的目的，更進一步降低腐蝕速率，製造了更鈍態的環境，使得金屬得以獲得保護，甚至室溫純水的腐蝕性都略高於加抑制劑的環境。

2. 不同環境下之高週疲勞行為比較

Fig. 2 為 AISI 347 不銹鋼在空氣、室溫純水、80°C 純水及 H₂SO₄ 水溶液中之軸向疲勞應力-壽命比較圖。由圖中可分別比較室溫純水與空氣的差異、溫度的影響及酸鹼值的影響。在室溫純水的影響方面，由 Fig. 2 可知，在室溫純水中高應力區的疲勞壽命略低於空氣中，而由 Fig. 3 可知，室溫純水和空氣中的裂縫成長速率幾乎重疊，由此可見造成室溫純水與空氣中高週疲勞壽命些微差異的主因應該是來自於裂縫起始。由 Fig. 4 (a) 與 Fig. 4 (b) 的疲勞破斷面可看出，AISI 347 不銹鋼在空氣中裂縫確切的起始點較不易判斷，而在室溫純水中的裂縫起始點則為一腐蝕衍生的表面缺口 (Fig. 4 (b) 中，字母 i 所標示的區域)，這應該是由於純水環境中的電化學反應速率較空氣中快所致。

在溶液的溫度對高週疲勞性質的影響方面，比較 Fig. 2 中室溫純水與 80°C 純水之曲線可知，80°C 純水的腐蝕疲勞壽命比室溫中純水來的短，再由 Fig. 3 可知，80°C 純水的裂縫成長速率略高於室溫

純水，這可能是由於高溫提高了裂縫表面之活化能，使得裂縫成長速率加速。另外，Atkinson et al.^[9] 及 Nakai et al.^[10] 的研究中也發現，溶液中的氧氣反應時會消耗氫離子，提高溫度則會降低溶氧量，進而促進氫脆的發生，進而加速裂縫成長。而 Wei^[11] 的研究也指出，環境溫度會影響電化學反應、離子擴散速率與裂縫成長之動能，加速裂縫成長。雖說 80°C 純水的高腐蝕速率可能使得此大範圍腐蝕區形成所需時間較室溫純水中來得短，但由 Fig. 4 (b) 及 Fig. 4 (c) 的腐蝕疲勞破斷面比較可以發現兩者的裂縫起始位置之腐蝕區大小差異不大，實際差異應該有限，所以使得 AISI 347 在 80°C 純水與室溫純水中裂縫起始所需的時間相去不遠，造成兩者對腐蝕疲勞壽命的影響只在於裂縫成長部份，因而差異有限。

在溶液的 pH 值對高週疲勞性質的影響方面，比較 pH = 6.3 的室溫純水與 pH = 3 的 H₂SO₄ 水溶液，由 Fig. 2 可知，在 H₂SO₄ 水溶液中的腐蝕疲勞壽命相對於室溫純水中有相當巨幅的降低，再對照 Fig. 3 可以發現，在 H₂SO₄ 溶液中的疲勞裂縫成長速率僅在低 ΔK 時略高於室溫純水，由此可知，H₂SO₄ 水溶液與室溫純水中的高週腐蝕疲勞壽命差異應是在於裂縫起始部份，而此所謂起始部份的影響包括了可能成為裂縫起始點的位置較多以及裂縫起始所需時間的縮短^[12-14]。而其起始區由 Fig. 4 (b) 及 Fig. 4 (d) 的腐蝕疲勞破斷面圖比較可看出，雖然 H₂SO₄ 水溶液的孔蝕傾向遠高於室溫純水，但在 Akid and Miller^[15] 的研究中也指出，pH 值降低後會提高鋼材表層鈍化膜的溶解度，進而使之崩潰而露出下面新的金屬，造成底下金屬的進一步溶解，而由於低 pH 值環境下表層鈍化膜溶解度的提高，加上循環應力的作用造成鈍化膜容易崩潰因而導致其腐蝕形態轉變為全面性均勻腐蝕，因此其裂縫起始處依然是大範圍的腐蝕區域而非局部孔蝕。另外，也由於以上種種因素作用之下，使得降低 pH 值對 347 不銹鋼的疲勞壽命有著最顯著的影響。

在氫離子對高週腐蝕疲勞性質的影響方面，比

較 Fig. 5 中的室溫純水及 3.5% NaCl 溶液可以發現，3.5% NaCl 溶液的腐蝕疲勞壽命比起室溫純水有非常明顯的降幅，而對照 Fig. 3 後可發現，兩者之疲勞裂縫成長速率並無差異，再由 Fig. 4 (b) 及 Fig. 4 (e) 的腐蝕疲勞破斷面比較可發現，3.5% NaCl 溶液中的試棒表面有一明顯的蝕孔存在 (Fig. 4(e) 中，字母 i 所標示的區域)，蝕孔穿透表面達數十微米深，明顯與室溫純水中大範圍腐蝕區的裂縫起源不同，因此可以斷定 3.5% NaCl 溶液造成疲勞壽命縮短的原因在於氯離子縮短了裂縫起始所需的時間。而關於孔蝕對於整體腐蝕疲勞壽命的影響上，Qian and Cahoon^[6] 在其研究中也指出，在疲勞試驗中，施加較高的循環應力能使材料產生更密集之滑移組織，再加上腐蝕環境的作用，沿著滑移帶處容易發生孔蝕，並成為裂縫起始位置。因為孔蝕的作用，在蝕孔附近會產生應力集中的現象，而加速裂縫的生成，故材料的耐孔蝕能力也會影響腐蝕疲勞壽命。

在含氯離子溶液中添加孔蝕抑制劑對高週疲勞性質的影響方面，比較 Fig. 5 中的 3.5% NaCl 及 3.5% NaCl + Inhibitor 二條曲線可以發現，3.5% NaCl 在添加了孔蝕抑制劑 (MPA) 之後，腐蝕疲勞壽命已有十分顯著的提升，甚至已經回升至與室溫純水中差不多，因此再一次確認了 3.5% NaCl 造成腐蝕疲勞壽命降低的主因在於蝕孔的形成。而由 Fig. 3 則可發現，3.5% NaCl + Inhibitor 的疲勞裂縫成長速率略高於 3.5% NaCl，顯示 MPA 對於腐蝕疲勞壽命的提升主要在於延長裂縫起始的時間而非減緩疲勞裂縫的成長。而由 Fig. 4 (b)、Fig. 4 (e) 及 Fig. 4(f) 的腐蝕疲勞破斷面比較則可觀察發現，3.5% NaCl + Inhibitor 的裂縫起始區已無類似 3.5% NaCl 中有明顯表面蝕孔作為疲勞裂縫起始點，甚至連室溫純水中可見的大範圍腐蝕區都沒有，足見 3.5% NaCl + Inhibitor 的效果不僅消除試棒表面蝕孔的生成，也提供了鈍態的保護隔離效果，降低鹽水環境對疲勞裂縫起始的影響，因此造成腐蝕疲勞壽命的回升。

比較特別的是，在 Fig. 4 (d) 及 Fig. 4 (f) 的破斷面上裂縫起始附近的起始成長區，可以觀察到少許明顯的孔洞存在於裂縫表面，這些孔洞應該是裂縫成長過程中腐蝕液在裂縫表面所造成的蝕孔。裂縫形成並開始成長之後，由於在裂縫尖端附近的腐蝕液對流不易，類似一個狹小的閉塞區，會因電解反應造成酸化的現象^[7]，造成裂縫尖端附近的 pH 與電位值與試棒平滑表面附近大環境的狀況大不相同；由於氯離子的侵蝕性在酸性環境中較中性環境更為強烈，因而造成在 3.5% NaCl + Inhibitor 的破斷面上 (見 Fig. 4 (f))，也可以在裂縫走過的表面上看到蝕孔的產生。這些蝕孔在短裂縫成長後所遺留的裂縫表面形成，之後隨著裂縫表面持續暴露在腐蝕液中而加深、變大，但由於裂縫在成長速度加快後腐蝕液便無充足的時間作用，致使蝕孔難以成核，因此這些既大且深的蝕孔皆只出現在裂縫起始點附近的慢速成長區，並且由於這些蝕孔並非位於試棒表面的裂縫起始位置，因此對疲勞壽命並不構成影響。

Fig. 6 為 AISI 347 不銹鋼在六種不同環境中之軸向疲勞應力振幅 壽命曲線的綜合比較圖，配合上述的種種討論可以知道，在環境參數對整體高週疲勞壽命的影響方面，影響較大的為溶液之 pH 值，影響次大的則為氯離子的影響。而本實驗所給定之溫度差異 (80°C 對室溫) 對整體疲勞壽命的影響在 AISI 347 不銹鋼上並不顯著，影響程度僅比室溫純水稍大，這可能和溫度只對裂縫成長速率有影響有關係，畢竟疲勞壽命主要還是決定於裂縫起始部份。至於添加MPA抑制劑的 3.5% NaCl 則因其抑制了孔蝕的發生及隔絕了腐蝕環境的作用之雙重影響，使得其整體疲勞壽命不但有著顯著的回升更甚而略高於室溫純水。

3. 不同環境下之疲勞裂縫成長行為比較

Fig. 3 為 AISI 347 不銹鋼在六種不同環境中，受力條件為應力比 $R = 0.1$ ，負荷頻率為 $f = 5 \text{ Hz}$ 時的疲勞裂縫成長曲線圖。由圖可知各種環境的疲勞

裂縫成長速率差異並不如 Fig. 6 中高週疲勞壽命有明顯的區隔，彼此之間的疲勞裂縫成長速率相差不大。比較特別的是在室溫的各環境中，3.5% NaCl + Inhibitor 的疲勞裂縫成長速率略高於其他環境，這並非因為 3.5% NaCl + Inhibitor 中的內在 (intrinsic) 裂縫成長速率太快，而是其他環境中由於裂縫表面上的腐蝕產物所造成的裂縫閉合效應明顯降低了有效的 ΔK 值，導致實際裂縫成長速率下降而低於 3.5% NaCl + Inhibitor 環境中的裂縫成長速率。

為了瞭解裂縫閉合效應的影響程度，本實驗利用撓度法量測了不同環境下的裂縫開啟拉力 P_{op} 值，並換算成裂縫開啟應力強度因子 K_{op} 以得到有效應力強度因子 ΔK_{eff} ($= K_{max} - K_{op}$, if $K_{op} > K_{min}$, or $= K_{max} - K_{min}$, if $K_{op} < K_{min}$)。Fig. 7 為 AISI 347 不銹鋼在不同環境中扣除裂縫閉合效應後所得到之裂縫成長速率比較圖 ($da/dN - \Delta K_{eff}$)，將之與 Fig. 3 比較可以發現，3.5% NaCl + Inhibitor 在扣除裂縫閉合效應前後的裂縫成長速率變異較小，原因是由腐蝕產物所導致的裂縫閉合效應較小，而其他五種環境中在扣除裂縫閉合效應後彼此之間的裂縫成長速率之差別仍然不大，但是這五種環境中在扣除裂縫閉合效應之前，低 ΔK 之下的裂縫成長速率原本都低於 3.5% NaCl + Inhibitor 中，但在扣除裂縫閉合效應後，低 ΔK 之下的有效裂縫成長速率已經全部高於 3.5% NaCl + Inhibitor 中，足見裂縫閉合效應在這幾種環境中對於裂縫成長速率的影響比重。

一般而言，裂縫閉合效應乃以塑性變形的觀念出發，隨著後續的研究，發現除了塑性變形誘起外，還有其它因素會造成裂縫閉合效應^[18-19]，而在腐蝕環境中則可能會因腐蝕產物而造成較大之裂縫閉合效應，本研究之情形即屬於此類。Fig. 8 為 AISI 347 不銹鋼在不同環境中之 CT 試片裂縫表面的腐蝕產物，由圖可知六種環境之中除了 3.5% NaCl + Inhibitor (見 Fig. 8 (f)) 之外，其餘五種環境中之 CT 試片裂縫表面上均可見到腐蝕產物存在，而 3.5% NaCl + Inhibitor 中的試片裂縫表面幾乎看不見腐蝕產物存在，試片破斷面之表面紋路清晰可見，因而

其裂縫閉合效應最不明顯。至於空氣中的破斷面上也存在有腐蝕產物，是因為其實空氣中並不算是完全的鈍態環境，Gao et al.^[20] 在其研究中發現，相對於真空中完全穿晶的延性破斷特徵，304 不銹鋼在空氣中及 3.5% NaCl 中的破斷模式皆偏向脆性，為穿晶伴隨著類劈裂面，因此他們在其研究中將空氣與 3.5% NaCl 歸類為有害環境。另外，在王鎮和^[21] 的研究中也發現，相對於比較鈍態的潤滑油環境中，沃斯回火球墨鑄鐵在空氣中之有效裂縫成長速率仍然比較高，相對之下空氣中仍屬腐蝕環境。這也是為何在 Fig. 7 空氣中的裂縫閉合效應與其他四種水溶液環境中差不多，並且在 Fig. 8 (a) 中也可發現少許腐蝕產物存在於裂縫表面上。

四、結論

1. H_2SO_4 水溶液對於 AISI 347 不銹鋼高週疲勞壽命之影響最為敏感，其次為 3.5% NaCl，至於室溫純水、80°C 純水及添加抑制劑的鹽水環境中的疲勞強度則與空氣中差異不大。
2. 3.5% NaCl 中造成高週腐蝕疲勞壽命降低的主因是蝕孔造成應力集中因而縮短了裂縫起始所須的時間，而在添加 MPA 型的孔蝕抑制劑後可防止試棒表面生成蝕孔作為裂縫起始，進而提高整體腐蝕疲勞壽命。
3. 在負荷頻率 5 Hz 的條件之下，各環境對於疲勞裂縫成長速率無顯著的影響，唯一的影響在於腐蝕作用所產生的腐蝕產物會產生裂縫閉合效應，進而減緩裂縫成長速率。
4. 腐蝕環境對於長裂縫的有效裂縫成長速率並無明顯的影響，但其對整體高週疲勞壽命卻有顯著的影響，特別是 H_2SO_4 溶液及 3.5% NaCl 中的腐蝕疲勞強度皆有巨幅的下降，顯然腐蝕環境對於裂縫起始及短裂縫成長階段的影響遠大於對長裂縫成長的影響。

誌謝

本研究承蒙國科會及原能會經費支持 (NSC90-2623-7-008-006-NU) , 特此致謝。

參考文獻

1. A. J. Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1996) p.13.
2. W. F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, 2nd ed. (McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1993) p.312.
3. I. Ben-Haroe, A. Rosen, and I. W. Hall, Materials Science and Technology, 9 (1993) 620.
4. O. Wachter and G. Brummer, Nuclear Engineering and Design, 168 (1997) 35.
5. "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," ASTM E466-96, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01 (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 1998) p.471.
6. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E647-95a, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01 (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 1998) p.562.
7. C.-K. Lin and S.-T. Yang, Engineering Fracture Mechanics, 59 (1998) 779.
8. O. Jonas, in Corrosion Fatigue of Steam Turbine Blade Materials, ed. R. I. Jaffee, (Pergamon Press, New York, USA, 1983) p. 3.35.
9. J. D. Atkinson, J. Yu, Z. Y. Chen, and Z. J. Zhao, Nuclear Engineering and Design, 184 (1998) 13.
10. Y. Nakai, K. Tanaka, and R. P. Wei, Engineering Fracture Mechanics, 24 (1986) 433.
11. R. P. Wei, Engineering Fracture Mechanics, 1 (1970) 633.
12. S. Zhang, T. Shibata, and T. Haruna, Corrosion, 55 (1999) 462.
13. K. H. Mayer, in Corrosion Fatigue of Steam Turbine Blade Materials, ed. R. I. Jaffee, (Pergamon Press, New York, USA, 1983) p. 2.1.
14. S. Zhang, T. Shibata, and T. Haruna, Corrosion, 54 (1998) 428.
15. R. Akid and K. J. Miller, in Fracture Behavior and Design of Materials and Structures, Vol. 3 (Engineering Materials Advisory Services Ltd., UK, 1990) p. 1403.
16. Y. R. Qian and J. R. Cahoon, Corrosion Science, 53 (1997) 129.
17. G. Sandoz, C. T. Fujii, and B. F. Brown, Corrosion Science, 10 (1970) 839.
18. S. Suresh and R. O. Ritchie, International Metals Reviews, 29 (1984) 445.
19. A. K. Vasudeven, K. Sadanandam, and N. Louat, Materials Science and Engineering, A188 (1994) 1.
20. M. Gao, S. Chen, and R. P. Wei, Metallurgical Transactions A, 23A (1992) 355.
21. 王鎮和, "不同環境下之沃斯回火球墨鑄鐵疲勞裂縫成長行為," 國立中央大學機械工程研究所碩士論文(2000) .

表1. AISI 347 不銹鋼之化學成份

Table 1. Nominal chemical composition of AISI 347 stainless steel tested (wt%)

Cr	Ni	Mn	Nb	Si	Mo	Cu	Ca	C	N	S	P	Ta	Fe
17.28	10.33	1.67	0.63	0.59	0.09	0.08	0.05	0.05	0.035	0.025	0.023	<0.01	Bal.

表2. AISI 347 不銹鋼經退火熱處理後之機械性質

Table 2. Mechanical properties of annealed AISI 347 stainless steel

Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Hardness (HRB)	Elongation (in 25 mm) (%)
658	310	190	42	61.4

表3. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之相關電化學資料

Table 3. Polarization data for AISI 347 stainless steel in different environments

Environment	E_{corr} (mV _{SCE})	E_{pit} (mV _{SCE})	I_{corr} (μ A/cm ²)
Deionized water, RT, pH = 6.3	-346	542	0.107
3.5% NaCl, RT, pH = 6.1	-115	146	0.246
3.5% NaCl + 5000 ppm MPA, RT, pH = 11.1	-379	595	0.00459
H ₂ SO ₄ , RT, pH = 3.0	-385	363	0.641
Deionized water, 80°C, pH = 6.3	-398	206	0.518

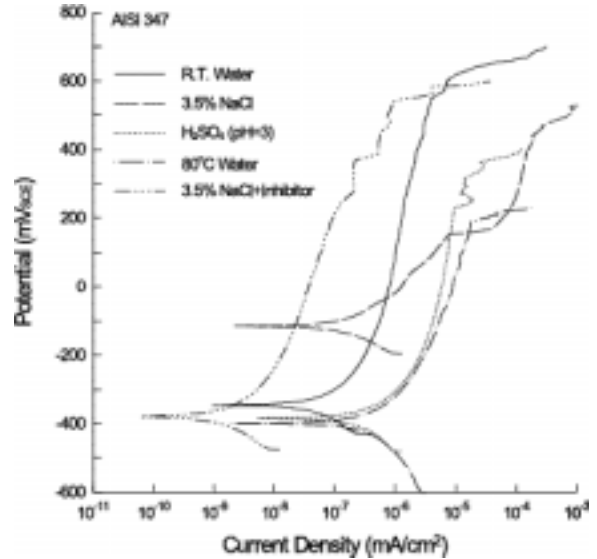


圖1. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之循環極化曲線比較圖

Fig.1 Cyclic anodic polarization curves in different environments for AISI 347 stainless steel.

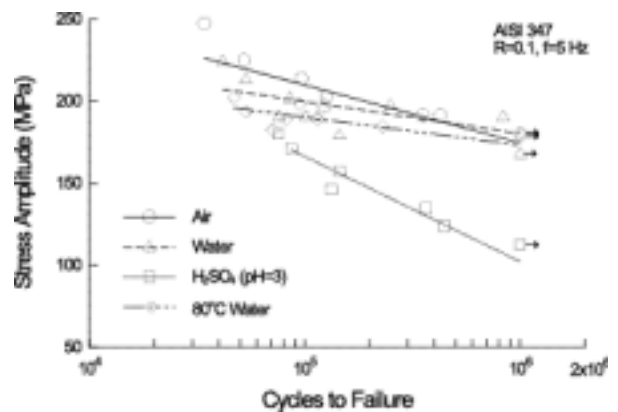


圖2. AISI 347 不銹鋼在空氣及不同水溶液環境中之S-N 曲線比較圖

Fig.2 Comparison of S-N curves for AISI 347 stainless steel tested in air and different aqueous environments. (Arrows designate runout tests)

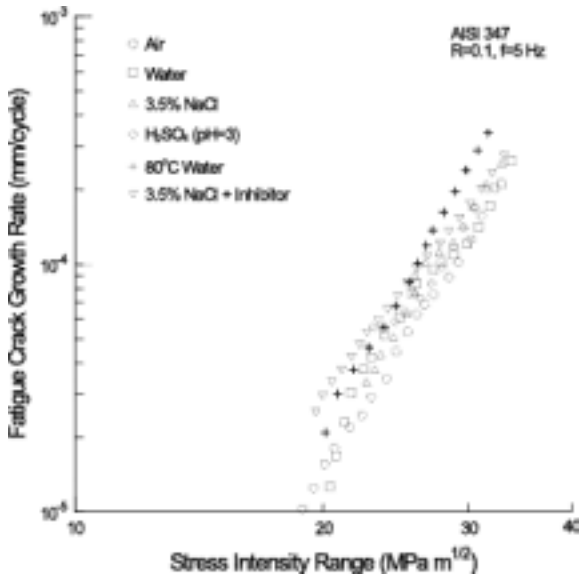
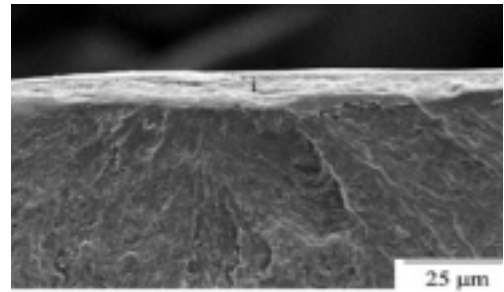
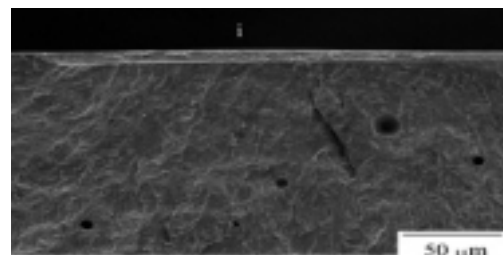


圖3. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之疲勞裂縫成長速率

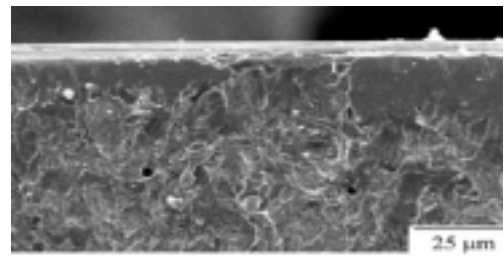
Fig.3 Fatigue crack growth rate curves tested in different environments for AISI 347 stainless steel.



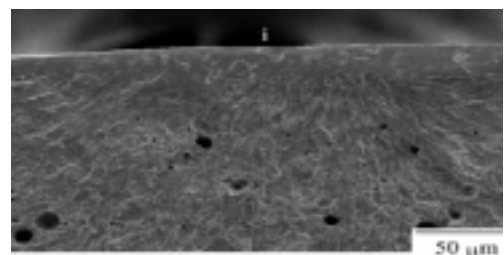
(c)



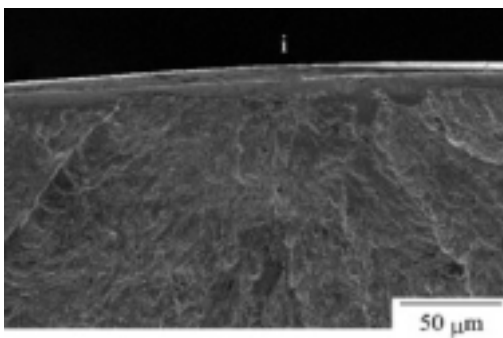
(d)



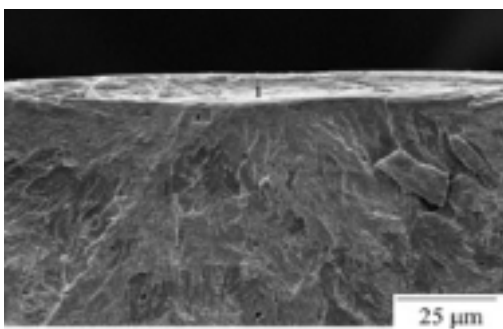
(e)



(f)



(a)



(b)

圖4. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之高週疲勞破斷面：(a) air, (b) water, (c) 80°C water, (d) H₂SO₄, (e) 3.5% NaCl, and (f) 3.5% NaCl with inhibitor. (i : 裂縫起始處)

Fig.4 SEM fractography of AISI 347 HCF specimens tested in different environments: (a) air, (b) water, (c) 80°C water, (d) H₂SO₄, (e) 3.5% NaCl, and (f) 3.5% NaCl with inhibitor. (i : crack initiation site)

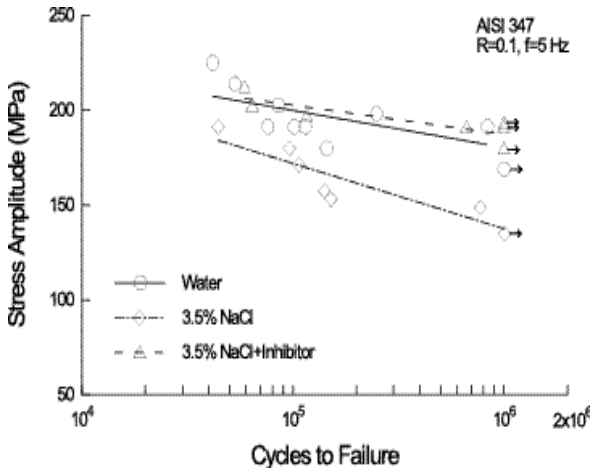


圖5. AISI 347 不銹鋼在純水及鹽水環境中之 S-N 曲線比較圖

Fig.5 Comparison of S-N curves for AISI 347 stainless steel tested in water and different salt water environments. (Arrows designate runout tests)

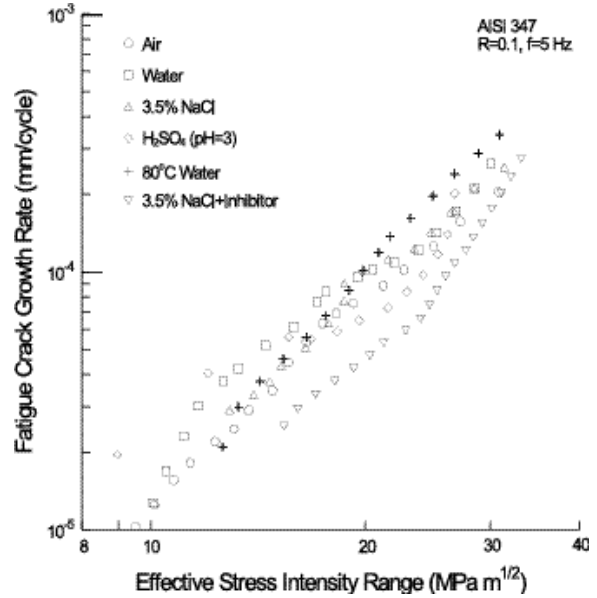


圖7. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之有效疲勞裂縫成長速率圖

Fig.7 $(da/dN) - \Delta K_{eff}$ curves in different environments for AISI 347 stainless steel.

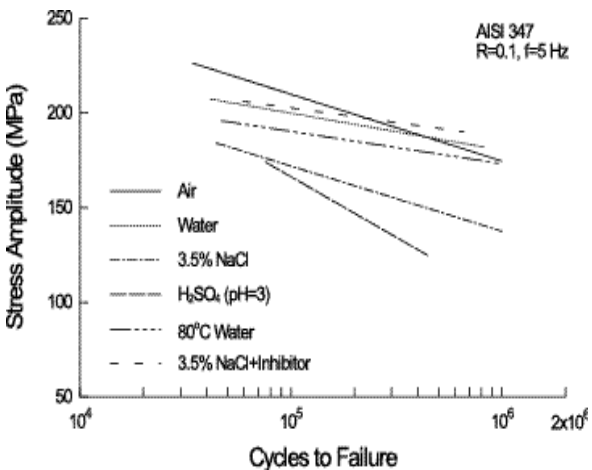
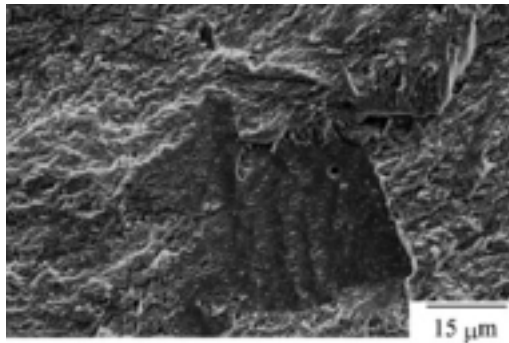
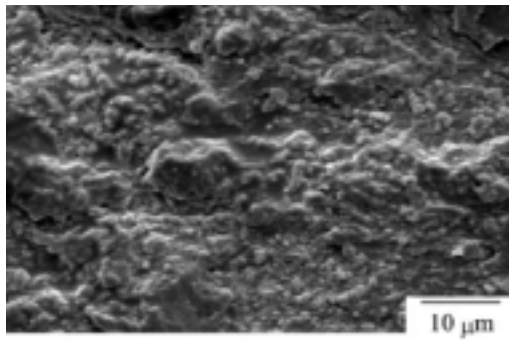


圖6. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之 S-N 曲線比較圖

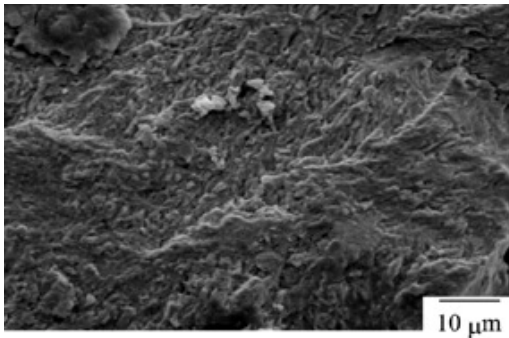
Fig.6 Comparison of S-N curves for AISI 347 stainless steel tested in different environments.



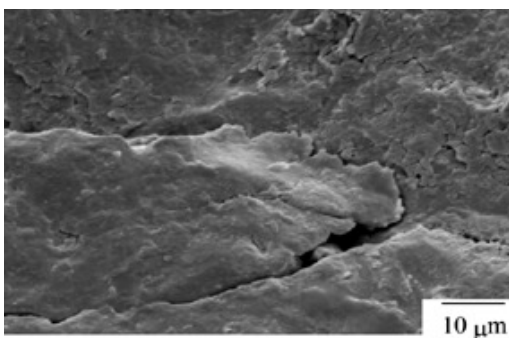
(a)



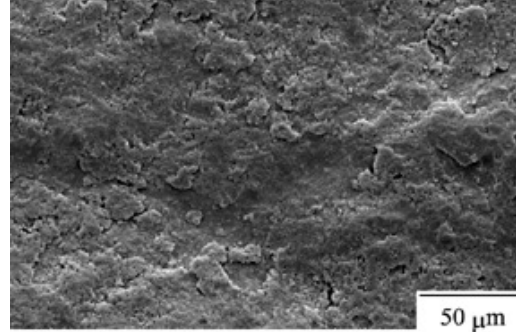
(b)



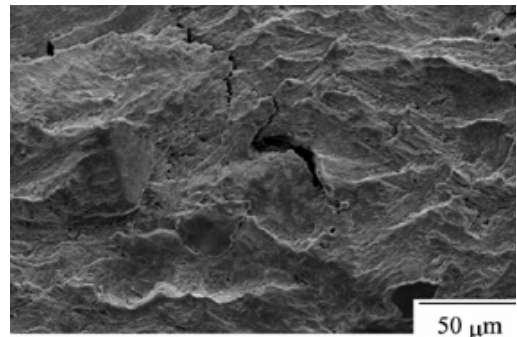
(c)



(d)



(e)



(f)

圖8. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之CT 試片破斷面: (a) air, (b) water, (c) 80°C water, (d) H₂SO₄, (e) 3.5% NaCl, and (f) 3.5% NaCl with inhibitor.

Fig.8 SEM fractography of AISI 347 CT specimens tested in different environments: (a) air, (b) water, (c) 80°C water, (d) H₂SO₄, (e) 3.5% NaCl, and (f) 3.5% NaCl with inhibitor.