

## 凹槽效應對 AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞性質之影響

郭柏甫、林志光\*

### Notch Effect on the Corrosion Fatigue Properties of AISI 347 Stainless Steel

P. F. Kuo and C. K. Lin\*

#### 摘 要

本研究主旨在探討凹槽效應對 AISI 347 不銹鋼高週腐蝕疲勞性質之影響。實驗結果顯示，AISI 347 不銹鋼之不同形狀試棒，在空氣及四種水溶液中之高週疲勞壽命皆有隨應力集中因子的增加而減少之趨勢，而腐蝕環境中之缺口敏感度以純水及鹽水加抑制劑較高。分別比較平滑試棒與半圓形凹槽試棒之各環境間應力-壽命曲線，各曲線有清楚差異，由高至低依序為空氣、鹽水加抑制劑、純水、鹽水與  $H_2SO_4$  水溶液。V形凹槽試棒之應力-壽命曲線圖則分為兩群，空氣與鹽水加抑制劑為一群，而另一群為純水、鹽水及  $H_2SO_4$  水溶液，此現象主要是因 V 形凹槽試棒的局部酸化程度比半圓形凹槽試棒嚴重所造成。本研究利用最大應力、應力範圍和最大應力體積或最大應力表面積為整合參數，求得一涵蓋凹槽效應之通用疲勞評估模式，對不同環境下之不同形狀試棒的高週疲勞壽命有良好的描述性。

關鍵詞：凹槽效應；腐蝕疲勞；壽命評估；局部酸化。

#### ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the influence of notch effect on the high-cycle corrosion fatigue properties of AISI 347 stainless steel in various environments, namely, air, water, NaCl, NaCl plus inhibitor, and  $H_2SO_4$  solutions. Results showed that the fatigue lives in various specimen geometries tested in air and four aqueous environments were decreased with increasing stress concentration factor, and the fatigue notch sensitivity among the given corrosion environments was higher in water and 3.5% NaCl solution added with inhibitor. For smooth and semi-circular notch specimens, the rank of fatigue strength in all of the given environments took the following order: air > salt water plus inhibitor > water > salt water > sulfuric acid solution. For V-notch specimens, the S-N curves were separated into two groups; i.e., one group with air and 3.5% NaCl plus inhibitor and the other with water, 3.5% NaCl and  $H_2SO_4$ . This was attributed to a greater effect of localized acidification occurring at the root of a V-notch as compared to a smooth shape and semi-circular notch. A parameter incorporating with the maximum stress, stress

amplitude and highly stressed volume (or area) was introduced and well correlated with the fatigue life of various specimen geometries in the given environments.

Keywords : Notch effect; Corrosion fatigue; Life prediction; Localized acidification.

## 1. 前言

由於 300 系列沃斯田鐵基不銹鋼具有適當的強度、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<sup>[1]</sup>。其中 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，使晶界易受腐蝕環境的侵蝕，發生所謂的沿晶腐蝕 (intergranular corrosion)，而此狀態下的沃斯田鐵系不銹鋼即稱之為敏化 (sensitizing)，並較易發生沿晶應力腐蝕破裂 (IGSCC, intergranular stress corrosion cracking)<sup>[2]</sup>。

為了改善上述敏化所造成抗蝕能力降低的現象，改良型的沃斯田鐵系不銹鋼 AISI 347 添加了鉬、鈮元素，藉著這些元素較鉻易與碳形成安定之碳化物 (如碳化鈦、碳化鈮)，減少鉻的碳化物析出於晶界而提升其抗沿晶腐蝕性，並在 900 至 925 °C 之間的溫度進行安定化熱處理，以確保鈮或鉬的碳化物有最大量的析出，降低在冷卻過程中晶界上析出富鉻碳化物的機會，達成安定化的效果<sup>[1]</sup>。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<sup>[3]</sup>，例如核電廠的冷卻水泵 (reactor coolant pump, RCP) 主軸、冷卻水管等等<sup>[4]</sup>。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 (如冷卻水泵軸) 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。藍一龍<sup>[5]</sup>、許文騰<sup>[6]</sup> 先後討論 347 不銹鋼在不同水媒環境的腐蝕疲勞行為及不同應力比與頻率的效應，但一般而言，疲勞裂縫皆始於結構上受到相對最大動態應力集中的位置，此現象往往是機械性因素或材料的關係，而最大應力集中的位置又常常是組件幾何形狀上的不連續或材料內部的缺陷。因此本研究將以半圓形 ( $K_t = 1.74$ ) 及 V 形 ( $K_t = 3.40$ ) 凹槽試棒，來模擬幾何上不連續有應力集中的情形，以瞭解凹槽效應在腐蝕環境中對 347 不銹鋼疲勞性質之影響。此外，在流動緩慢的腐蝕溶液中，易有局部酸化的現象，因此探討在不同酸鹼值及離子之水媒環境下含凹槽試棒的腐蝕疲勞性質，將有助於了解應力集中處疲勞裂縫起始與水媒環境的關聯性。

## 2. 實驗方法

### 2.1 材料及試片製作

本研究所使用的材料為 Carpenter 公司生產，經過固溶處理 347 不銹鋼圓棒，並加工成軸向平滑疲勞試棒 (依 ASTM E466<sup>[7]</sup>)。此外，為了比較疲勞缺口效應，試棒另加工成半圓形環狀缺口和 V 形環狀缺

口兩種，詳細的試棒尺寸如圖 1 所示。此外本研究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，隨後再進行些微的細加工及拋光，以達到所需試棒的尺寸要求。退火熱處理條件為置於 1050℃ 空氣爐中 1 小時後垂直水淬，退火後材料之機械性質如表 1 所示。

## 2.2 實驗環境

本實驗採用五種環境對實驗材料進行試驗，包括空氣、去離子純水 (pH = 6.3)、3.5% NaCl (pH = 6.0)、3.5% NaCl + 孔蝕抑制劑 (pH = 11.1)、pH = 3 的硫酸 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 50 ppm) 水溶液，而其中 pH = 3 之硫酸環境目的為模擬實際環境中常發生的局部酸化之情形<sup>[8]</sup>。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。

## 2.3 疲勞試驗

軸向疲勞試驗依 ASTM E466<sup>[7]</sup> 規定之流程，使用 MTS 810 動態材料試驗機，採用軸向力量控制，應力比 ( $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ) 為 0.1，頻率為 5 Hz 之正弦波，在不同的最大應力值下測試，直到試棒破斷或達到預設之循環數 10<sup>6</sup> 為止，從應力振幅 (S) 和循環次數 (N) 之間的關係，即可求得 S-N 疲勞曲線。腐蝕環境中之疲勞實驗裝置和參考文獻<sup>[9]</sup> 中相同。

## 2.4 凹槽處 pH 值量測

準備不同量測範圍之 pH 試紙、針筒和數位 pH 量測計，將半圓形及 V 形試棒分別放入裝有四種不同水溶液的容器中，利用微細針頭的毛細管現象吸取缺口處的部分溶液，滴在 pH 試紙上，可大略得知其 pH 值，並利用數位 pH 量測計量測容器內水溶液 pH 值，比較兩者間及不同形狀凹槽根部的 pH 值，結果列於表 2。

## 2.5 破斷面觀察

將軸向疲勞破壞試棒之端部用慢速切割機切下，並以高純度酒精做超音波清洗表面附著的雜質，然後使用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察其破斷面，分析瞭解不同環境下疲勞破裂的起源及機制。

## 3. 結果與討論

### 3.1 凹槽效應對高週腐蝕疲勞的影響

圖 2 為平滑試棒、半圓形及 V 形凹槽試棒在不同環境下的軸向疲勞應力振幅-壽命曲線圖，由圖中發現，在不同測試環境下，疲勞壽命隨著不同凹槽形狀之應力集中因子 ( $K_t$ ) 的增加而減少。一般而言，凹槽對構件來說是一種缺陷，受循環負載時，由於應力集中效應，凹槽根部所承受的應力值會高於平滑處的好幾倍，因而容易促使裂縫提早起始，其成長速率也會較快，導致整體疲勞壽命的大幅降低。表 3 為三種幾何形狀試棒在五種環境中，應力比  $R = 0.1$  之疲勞強度、疲勞缺口因子 ( $K_f$ ,  $K_f = S_{\text{unnotch}} / S_{\text{notch}}$ ) 與缺口敏感度 ( $q$ ,  $q = (K_f - 1) / (K_t - 1)$ )，此處疲勞強度是由應力-壽命圖中以 10<sup>6</sup> 循環數所對應之應力振幅值， $S_{\text{unnotch}}$  及  $S_{\text{notch}}$  是利用 Goodman 法則<sup>[10]</sup> 所計算出在  $R = -1$  時之疲勞限 ( $S_c$ )， $q$  則是利用所求出之  $K_t$  與  $K_f$  值計算。由表中得知，各環境之疲勞強度隨著  $K_t$  值的增加而降低，其中以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液之疲勞強度相較於空氣中下降最多。缺口敏感度則以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中最低，其次是 3.5% NaCl，其餘三環境則可視為一組。一般來說，在與劇烈腐蝕環境的作用下，易造成試棒表面的破壞、蝕孔的生成與缺陷的產生。由腐蝕環境所形成之表面缺陷，其產生外加的應力集中作用有可能大於或等於試棒幾何形狀所提供之應力集中效應，因此缺口敏感度  $q$  在 NaCl 與 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中較低，相對的缺口效應較不明顯。

比較三種試棒形狀在不同環境下之應力-壽命曲線，結果如圖 3 所示。為方便觀察，圖中僅示依圖 2 所有數據點迴歸而得之曲線。由圖中發現，任一形狀的試棒在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中的疲勞強度最低，其次為 3.5% NaCl 水溶液。此結果和藍一龍<sup>[5]</sup> 的實

驗結果相同，由其電化學實驗指出，NaCl 具有較強的孔蝕傾向，易於試棒表面造成蝕孔，而當蝕孔生成時，所產生的應力集中現象會促使裂縫起始，進而減短疲勞壽命。而此款鋼材在  $H_2SO_4$  水溶液中，試棒受環境腐蝕的程度更為嚴重，加上其較低的 pH 值會提高試棒表面鈍化膜的溶解度，使鈍化膜在受循環應力時更易崩解，造成新鮮金屬的裸露及腐蝕，在反覆的交互作用下，導致疲勞壽命的大幅降低。由表3中發現，平滑試棒中  $H_2SO_4$  水溶液的疲勞強度最小，而於相同環境條件的比較下，又以V形凹槽試棒中之  $H_2SO_4$  水溶液最低。

此外，圖3中發現平滑試棒與半圓形凹槽試棒各環境之疲勞壽命曲線仍有差異，由高而低依序為空氣、3.5% NaCl + 抑制劑、純水、3.5% NaCl 與  $H_2SO_4$  水溶液，而V形凹槽則沒有此現象，在其不同環境下的 S-N 曲線中(圖3(c))，大致可分為兩組，空氣和添加孔蝕抑制劑之 3.5% NaCl 水溶液一組，另一則為純水、3.5% NaCl 及  $H_2SO_4$  水溶液。Jonas<sup>[8]</sup> 指出，在溶液流動比較緩慢的位置如間隙、凹槽底部、沈澱物聚集處等地方，常可發現有局部酸化之現象，其 pH 值可低至 3.5 左右。本研究因此做了一簡單的實驗，利用注射針頭汲取凹槽根部之液體藉以量測凹槽根部附近的 pH 值並與大環境體積溶液的 pH 值作比較，結果列於表2。從此表中可以看出大概的趨勢，半圓形凹槽根部的 pH 值比外部溶液 pH 值低一些，V 形凹槽根部 pH 值則有明顯的降低，可見V形凹槽根部附近的酸化程度大於半圓形凹槽根部。但此方法僅可視為一定性的量測，實際真實的數值並不容易量得，可是由表2的數值趨勢可推測出凹槽根部的實際 pH 值應更低於此值，此符合 Jonas<sup>[8]</sup> 所提出溶液在流動緩慢處會出現局部酸化的現象。因此，本研究中純水與 NaCl 水溶液可能受局部酸化的影響，使得在 V 形凹槽根部附近的 pH 值大幅降低而與酸性  $H_2SO_4$  水溶液之疲勞強度差不多，為一族群，而添加抑制劑的鹽水溶液也因局部酸化降低了其 pH 值，但其值仍高於另三種水溶液，此將於之後再多加討論。

在氯離子的影響方面，由圖3的比較發現，不同幾何形狀的試棒於鹽水中的疲勞壽命皆比空氣及

純水兩環境中來的短，且由圖4<sup>[5]</sup>各水媒環境下之疲勞裂縫成長速率-應力強度因子範圍 (da/dN- $\Delta K$ ) 關係圖中發現，三種環境中的疲勞裂縫成長速率差異並不大，因此推測在 3.5% NaCl 水溶液中高週疲勞壽命縮短的主要原因，是由於氯離子造成蝕孔的生成而縮短裂縫起始所需的時間所致。在藍一龍<sup>[5]</sup>針對此款鋼材的腐蝕疲勞研究中指出，3.5% NaCl 水溶液有較強的孔蝕傾向，而蝕孔生成所產生的應力集中現象，促使疲勞裂縫提早起始，進而導致壽命的降低。若比較添加孔蝕抑制劑和 3.5% NaCl 水溶液對不同形狀試棒之影響，由圖3觀察之，發現 3.5% NaCl 水溶液在添加抑制劑後，其高週疲勞壽命明顯地提高，提昇至和空氣中的疲勞壽命差不多甚至更高。本實驗所添加之 MPA 孔蝕抑制劑，其化學成份為  $C_4H_{11}NO$ ，濃度為 3000 ppm。Schweinsberg et al.<sup>[11]</sup> 的研究指出，MPA 可吸附在金屬表面形成一層保護膜，而此保護膜能有效阻隔腐蝕環境的作用，減少在 3.5% NaCl 水溶液中蝕孔的生成，由實驗結果可知，本研究中所添加的抑制劑的確能有效地抑制孔蝕的發生，延長裂縫起始所需的時間，進而提昇材料的疲勞壽命。此外，本研究中鹽水添加孔蝕抑制劑後溶液的 pH 值會由原先 pH = 6.0 的弱酸溶液變為 pH = 11.1 的鹼性水溶液，因而會降低水溶液中的腐蝕作用並增加裂縫起始的時間，加上 MPA 會於金屬表面形成一隔絕腐蝕環境之保護膜，減少腐蝕環境的作用進而增長其疲勞壽命。且局部酸化的影響，雖使得添加抑制劑的鹽水在凹槽根部附近的 pH 值降低，但仍高於另三者水媒環境之根部 pH 值，綜合前述，疲勞強度也就會相對地提高而與空氣中的強度值差不多，因此於圖3(c)中，V 形試棒之應力-壽命曲線分為兩組。

### 3.2 缺口效應的整合模式

由之前的討論可以發現，平滑試棒、半圓形凹槽與 V 形凹槽三種試棒，不論在何種環境下，疲勞壽命皆隨著應力集中因子的增加而降低，且於 S-N 圖中皆呈現出三曲線。而為了評估凹槽效應對腐蝕疲勞壽命的影響，本研究嘗試求出能涵蓋不同凹槽形狀之通用疲勞壽命評估模式。首先，影響缺口試

棒壽命的長短應該與應力集中效應導致凹槽根部所產生之最大應力有關，但實驗時並無法得知凹槽根部承受實際多大的應力，尤其是進入塑性區域後，根部的最大應力值不再等於公稱應力 (nominal stress) 乘以彈性應力集中因子  $K_t$ ，故藉由有限元素法軟體 ANSYS 來計算缺口試棒受力後，凹槽根部實際承受之最大應力值。由空氣、純水、3.5% NaCl 與  $H_2SO_4$  四種環境下平滑試棒承受之最大負載力與所計算出之凹槽試棒根部最大應力對壽命之關係圖，得知其相關係數  $r^2$  約在 0.51~0.70，並不理想。此外，構件實際是受循環負載的疲勞狀態，可用  $\Delta \sigma$  ( $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ) 來描述此疲勞行為，且 Kobayashi et al. [12] 曾定義出不同  $K_t$  值在硫酸中之 Seq ( $= \Delta S^n \times S_{\max}^{1-n}$ ) 與壽命 (N) 的關係，有不錯的整合情形。藉由此觀念，嘗試利用  $\sigma_{\max}$  與  $\Delta \sigma$  二者的組合來整合缺口效應與疲勞壽命之間的關係，定義如下：

$$N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2} \quad (3-1)$$

其中  $m_1, m_2$  為各自獨立之二個參數。圖5為在 NaCl 與  $H_2SO_4$  水溶液利用 Eq. (3-1) 以  $(\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2}$  對應疲勞壽命所得之整合結果，圖中所有應力的單位皆為 MPa，其中曲線為利用 Eq. (3-1) 對 NaCl 與  $H_2SO_4$  水溶液所求得之迴歸曲線，其相關係數  $r^2 = 0.81$  與 0.68，其他環境為 0.74 與 0.83，仍不理想。利用 Eq. (3-1) 對各環境之實驗數據迴歸後所得之參數列於表 4。一般而言，試棒承受之最大應力體積越大，裂縫由此可能區域起始之機率越高，疲勞壽命也就越短。因此若將 Eq. (3-1) 導入最大應力體積的影響修正後如下：

$$N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2} (V_{95})^{m_3} \quad (3-2)$$

其中  $V_{95}$  為利用材料力學及有限元素法軟體 ANSYS，計算分析出平滑試棒與不同缺口試棒之具有 95% 以上最大應力區域的體積，如表 5 所列。圖 6 為利用 Eq. (3-2) 所得 NaCl 與  $H_2SO_4$  水溶液整合結果，圖中應力的單位皆為 MPa， $V_{95}$  單位為  $mm^3$ ，

其相關係數  $r^2 = 0.88$  與 0.85，其餘環境之相關係數為 0.74 和 0.85，有不錯的效果，利用 Eq. (3-2) 對各環境之實驗數據迴歸後所得之相關參數列於表 6。此外，若考慮腐蝕環境的作用主要是與試棒的表面反應，再經由 ANSYS 分析與利用材料力學求出 95% 以上最大應力區域與腐蝕溶液接觸的表面積  $A_{95}$ ，以此取代 Eq. (3-2) 中  $V_{95}$ ，重新求得一整合模式，得到其相關係數  $r^2 = 0.74$ ~0.87 和之前考慮最大應力體積時差不多。由此可知，藉由凹槽根部實際承受之最大應力值 ( $\sigma_{\max}$ ) 與應力範圍 ( $\Delta \sigma$ ) 再加最大應力體積或表面積之關係，整體而言對評估凹槽效應在不同環境中對高週疲勞壽命的影響，可以得到較佳的整合模式。

### 3.3 破斷面之 SEM 觀察

觀察不同幾何形狀的試棒於空氣、純水、3.5% NaCl、3.5% NaCl 添加抑制劑與  $H_2SO_4$  五種環境下的 SEM 破斷面圖，發現有相似的趨勢，於此以空氣為例作說明，如圖 7 所示。由圖中可以發現，平滑試棒的疲勞裂縫皆由單一點起始，而半圓形凹槽試棒在低應力區時，同樣為單一點起始，但在高應力區時，則呈現多裂縫起始點，對於 V 形凹槽試棒而言，則不論在高應力或低應力區均為多裂縫起始。因為 V 形試棒凹槽根部受應力集中的效應較大，裂縫易從凹槽根部多方起始，進而大幅降低其疲勞壽命。而半圓形凹槽試棒則需受高應力時，加上應力集中效應，才會產生多裂縫起始進而縮短疲勞壽命。反觀平滑試棒和半圓形缺口試棒承受低應力時，其疲勞裂縫均為單一起始，不同於 V 形試棒有較多的起始點，因而有較長的疲勞壽命。一般而言，鋼材在空氣中之高週疲勞壽命主要消耗在裂縫起始階段，亦即裂縫一旦發生，材料在短時間內就可能產生破壞，換言之，裂縫起始所需的時間主導了整體疲勞壽命的長短。而由於多裂縫起始大幅縮短消耗在起始階段的時間，因此本研究中 V 形凹槽試棒的疲勞壽命相對較短。

由半圓形與 V 形凹槽試棒裂縫起始區的破斷面圖觀察，發現在各水媒環境中疲勞裂縫大多由腐蝕所造成之表面缺口或蝕孔起始，其中以 3.5% NaCl

氯離子水溶液中更為明顯，如圖 8 所示。相對於水媒環境，空氣中的起始點則較不明確，因此，半圓形與 V 形凹槽試棒在各水媒環境的腐蝕疲勞壽命相對地比空氣中的壽命短。且裂縫的破裂型態為穿晶模式。一般而言，平滑試棒的疲勞裂縫起源通常為表面的滑移帶，然而若處於腐蝕環境中，裂縫則大多由腐蝕所造成之表面缺口或蝕孔起始進而成長、破裂。對於凹槽試棒而言，由於凹槽根部的水溶液流動緩慢，因此試棒表面與水媒環境的作用較為充分、劇烈，加速表面腐蝕缺陷或蝕孔的生成，所以裂縫更易由此起始而縮短疲勞壽命。

#### 4. 結論

1. 347 不銹鋼三種幾何形狀之試棒，在空氣及四種水溶液中，其高週疲勞壽命會隨應力集中因子的增加而減少。整體而言，以 V 形凹槽試棒在  $H_2SO_4$  水溶液與 3.5% NaCl 中有較低的疲勞強度，而凹槽效應在腐蝕環境中，此兩者之缺口敏感度不如純水與鹽水添加抑制劑來得高。
2. 在平滑試棒與半圓形凹槽試棒之應力-壽命曲線圖中各環境間有所差距，依序為空氣、鹽水加抑制劑、純水、鹽水與  $H_2SO_4$  水溶液。V 形凹槽試棒之應力-壽命曲線圖則分為兩群，此乃 V 形凹槽試棒局部酸化的程度比半圓形凹槽試棒明顯，造成在純水、鹽水及  $H_2SO_4$  水溶液中之疲勞壽命相差無幾。
3. 利用  $(\sigma_{max})^{-m_1} (\Delta \sigma)^{-m_2} (V_{95})^{-m_3}$  或  $(\sigma_{max})^{-m_1} (\Delta \sigma)^{m_2} (A_{95})^{-m_3}$  三項整合參數所得到之缺口效應疲勞壽命通用評估模式，對各環境下不同凹槽形狀試棒之高週疲勞壽命有不錯的整體描述結果。
4. 由於 V 形凹槽試棒受應力集中作用的效應較明顯，導致裂縫起始處不同於平滑及半圓形凹槽試棒受低應力時之單一點起始，而是呈現多裂縫起始點，因而有較短的疲勞壽命。

#### 參考文獻

1. A. J. Sedriks, in: Corrosion of Stainless Steels, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1996) p. 13.
2. W. F. Smith, in: 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) pp.620~626.
4. O. Wachter and G. Brummer, Nuclear Engineering and Design, 168 (1997) pp.35~52
5. 藍一龍，"AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞行為"，國立中央大學機械工程研究所碩士論文 (2001)。
6. 許文騰，"AISI 347 不銹鋼在不同應力比及頻率下之腐蝕疲勞行為"，國立中央大學機械工程研究所碩士論文 (2002)。
7. "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.
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. C.-K. Lin and S.-T. Yang, Engineering Fracture Mechanics, 59 (1998) pp.779~795.
10. A. Bannantine, J. Comer, and L. Handrock, in: Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1990), p. 7.
11. D. P. Schweinsberg, B. Sun, V. Otieno-Alego, Journal of Applied Electrochemistry, 24 (1994) pp.803~807.
12. Y. Kobayashi, Y. Tanaka, and H. Goto, Key Engineering Materials, 183-187 (2000) pp.999~1004.

#### 致謝

本研究承蒙國科會及原能會經費支持 (NSC92-

凹槽效應對 AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞性質之影響

表1. AISI 347 不銹鋼經退火熱處理後之機械性質

Table 1. 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2. 各水媒環境中外部溶液與凹槽根部附近之 pH 值

Table 2. pH of bulk solution and area near notch root in different aqueous environments

Environment	Bulk Solution	Near Notch Root	
		Semi-circular Notch	V notch
Water	6.3	~5.6	~5.3
3.5% NaCl	6.0	~5.6	~5.2
Inhibitor	11.1	~9.5	~8.5
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.0	~2.8	~2.7

表3. AISI 347 不銹鋼不同幾何形狀試棒在不同環境下之疲勞強度、疲勞缺口因子與缺口敏感度

Table 3. Fatigue strength, fatigue notch factor and notch sensitivity factor for AISI 347 stainless steel with various specimen geometries in different environments

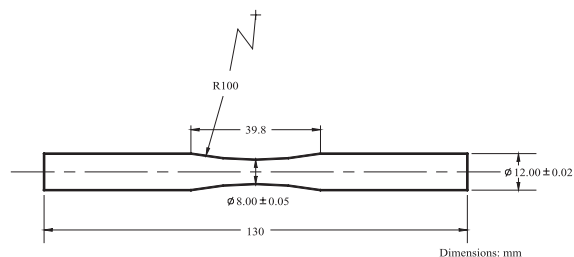
Environment Notch Shapes	Air			Deionized water			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH = 3)		
	Fatigue Strength at 10 <sup>6</sup> Cycles (MPa)	Fatigue Notch Factor, K <sub>f</sub>	Notch Sensitivity Factor, q	Fatigue Strength at 10 <sup>6</sup> Cycles (MPa)	Fatigue Notch Factor, K <sub>f</sub>	Notch Sensitivity Factor, q	Fatigue Strength at 10 <sup>6</sup> Cycles (MPa)	Fatigue Notch Factor, K <sub>f</sub>	Notch Sensitivity Factor, q
Smooth	172			175			108		
Semi-circular Notch (K <sub>t</sub> = 1.74)	131	1.47	0.64	124	1.6	0.81	97	1.15	0.20
V-notch (K <sub>t</sub> = 3.40)	84	2.55	0.65	73	3.08	0.87	67	1.78	0.33

Environment Notch Shapes	3.5% NaCl			3.5% NaCl + Inhibitor		
	Fatigue Strength at 10 <sup>6</sup> Cycles (MPa)	Fatigue Notch Factor, K <sub>f</sub>	Notch Sensitivity Factor, q	Fatigue Strength at 10 <sup>6</sup> Cycles (MPa)	Fatigue Notch Factor, K <sub>f</sub>	Notch Sensitivity Factor, q
Smooth	136			187		
Semi-circular Notch (K <sub>t</sub> = 1.74)	110	1.31	0.42	136	1.57	0.77
V-notch (K <sub>t</sub> = 3.40)	68	2.35	0.56	91	2.61	0.67

表4. 各環境中利用  $N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2}$  所整合之各參數

Table 4. Values of parameters in  $N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2}$  for AISI 347 stainless steel in various environments

Environment	$C_1$	$m_1$	$m_2$	Correlation Coefficient ( $r^2$ )
Air	26.72	-5.82	-2.32	0.828
Water	27.53	-4.99	-3.55	0.739
3.5% NaCl	25.48	-6.37	-1.56	0.806
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	16.76	-4.70	-0.16	0.681

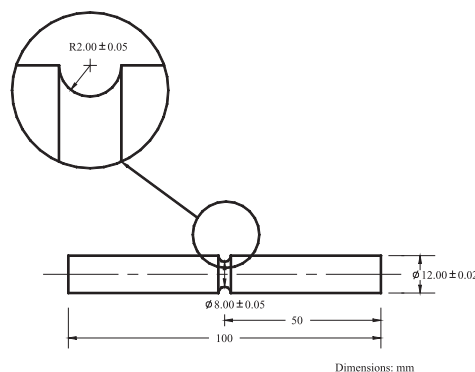


(a)

表5. 不同幾何形狀試棒之 95% 最大應力體積與表面積

Table 5. Highly stressed volume and area of various specimen geometries

Specimen Geometry	Highly Stressed ( $\geq 95\% \sigma_{\max}$ ) Volume (mm <sup>3</sup> )	Highly Stressed ( $\geq 95\% \sigma_{\max}$ ) Area (mm <sup>2</sup> )
Smooth	590.93	392.335
Semi-circular Notch	11.517	43.756
V-notch	0.147	1.509

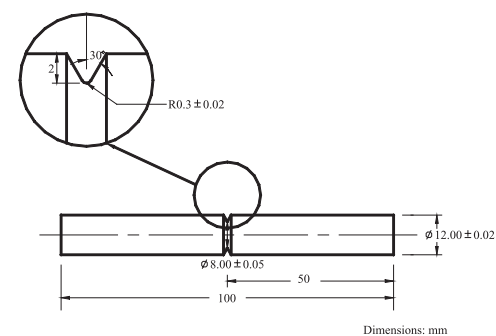


(b)

表6. 各環境中利用  $N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2} (V_{95})^{m_3}$  所整合之各參數

Table 6. Values of parameters in  $N = C_1 (\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta \sigma)^{m_2} (V_{95})^{m_3}$  for AISI 347 stainless steel in various environments

Environment	$C_1$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	Correlation Coefficient ( $r^2$ )
Air	27.00	-4.53	-3.64	-0.09	0.853
Water	27.67	-5.23	-3.38	0.02	0.740
3.5% NaCl	26.07	-4.92	-3.14	-0.12	0.879
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18.42	-3.19	-1.88	0.04	0.848



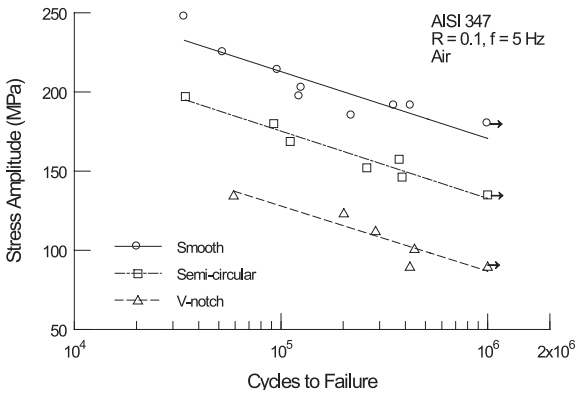
(c)

圖1. 高週疲勞試棒之幾何形狀: (a) 平滑試棒、(b) 半圓形凹槽試棒及 (c) V形凹槽試棒

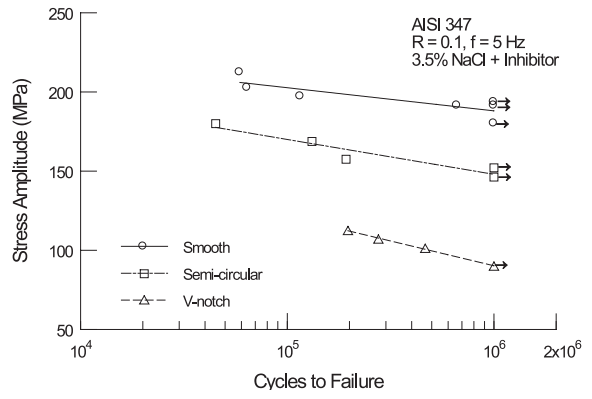
Fig.1 Geometries of high-cycle fatigue specimens: (a) smooth specimen, (b) semi-circular notch specimen, and (c) V notch specimen.



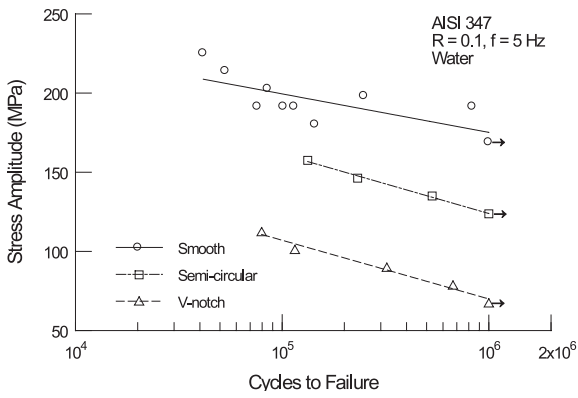
凹槽效應對 AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞性質之影響



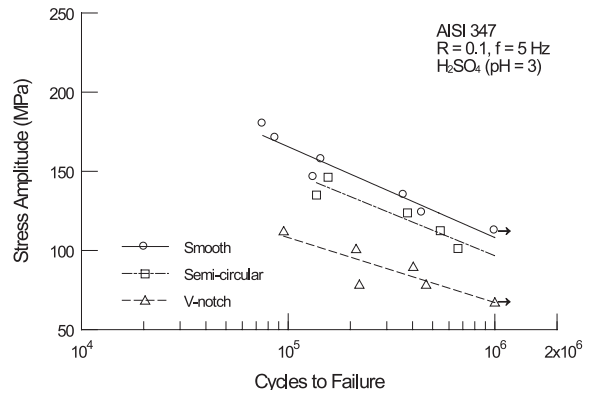
(a)



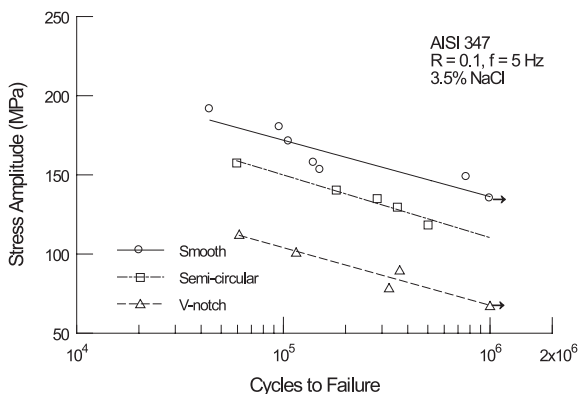
(d)



(b)



(e)



(c)

圖2. AISI 347 不銹鋼在 (a) air、(b) water、(c) 3.5% NaCl、(d) 3.5% NaCl + 抑制劑及 (e) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 中不同幾何形狀試棒之 S-N 曲線比較圖。(箭頭表示該點試棒未斷)

Fig.2 S-N curves for AISI 347 stainless steel with various notch shapes in different environments: (a) air, (b) water, (c) 3.5% NaCl, (d) 3.5% NaCl with inhibitor, and (e) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. (Arrows designate runout tests.)

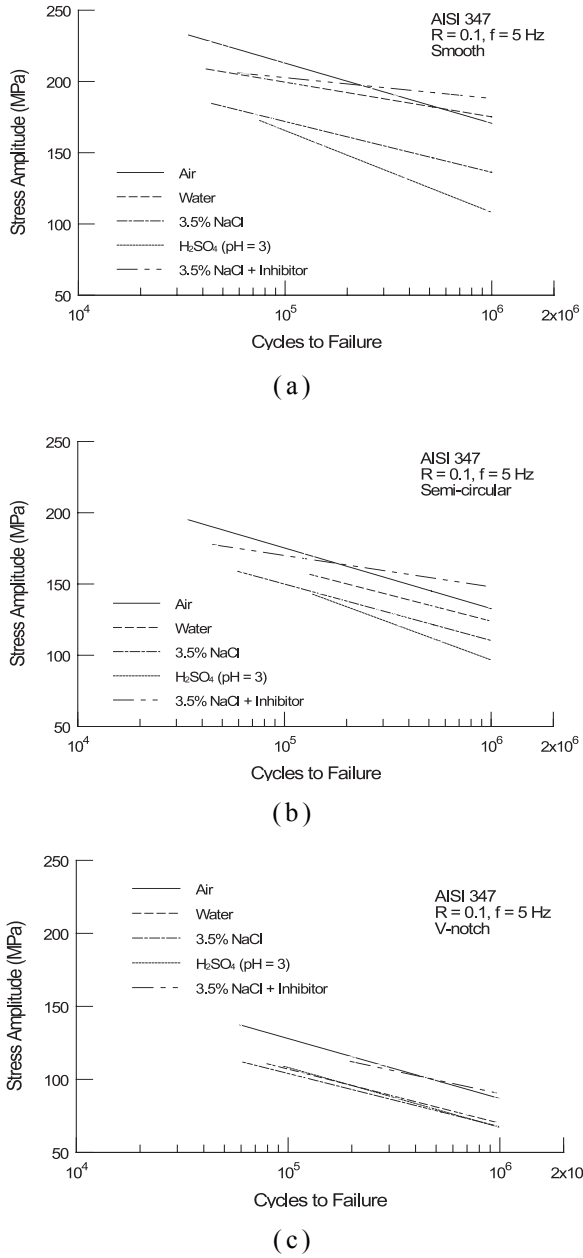


圖 3. AISI 347 不銹鋼三種幾何形狀之試棒在不同環境中之 S-N 曲線比較圖

Fig.3 Comparison of S-N curves in various environments for AISI 347 stainless steel with different specimen geometries: (a) smooth, (b) semi-circular notch, and (c) v-notch.

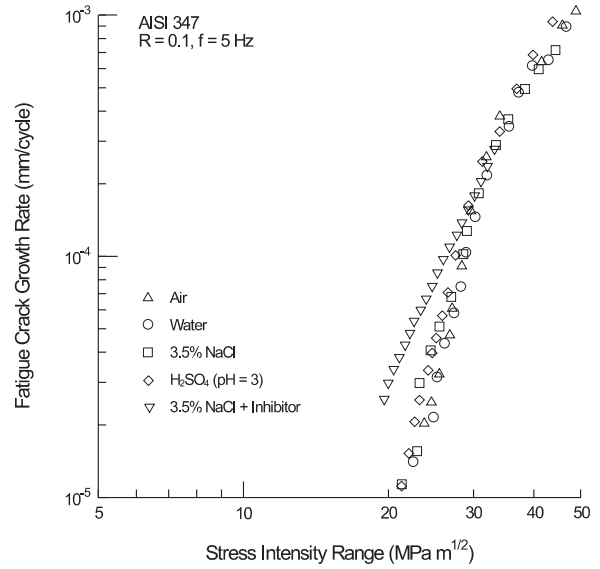
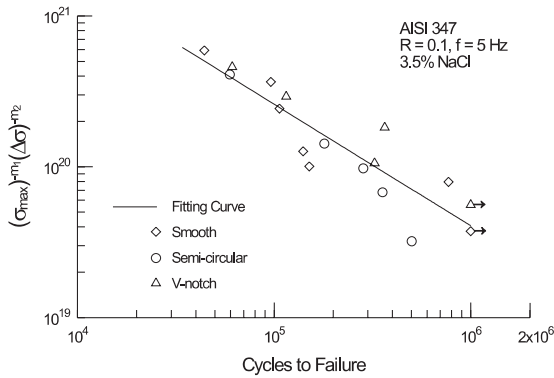


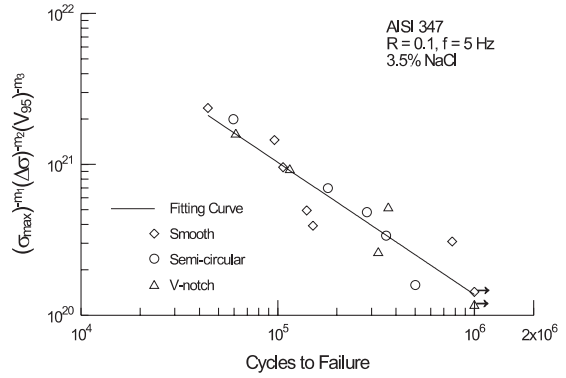
圖 4. AISI 347 不銹鋼在不同環境中之疲勞裂縫成長速率比較圖

Fig.4 Fatigue crack growth rate curves for AISI 347 stainless steel in different environments.<sup>[5]</sup>

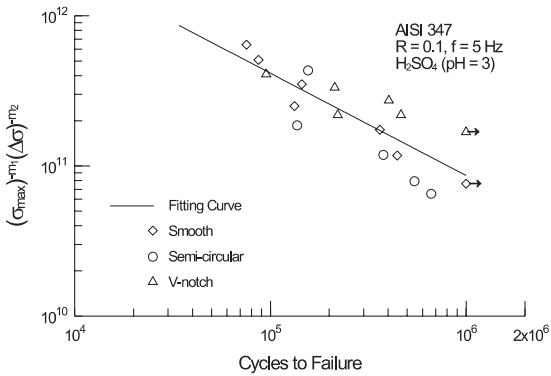
凹槽效應對 AISI 347 不銹鋼腐蝕疲勞性質之影響



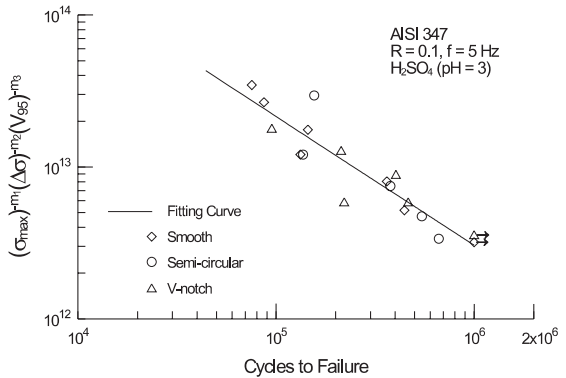
(a)



(a)



(b)



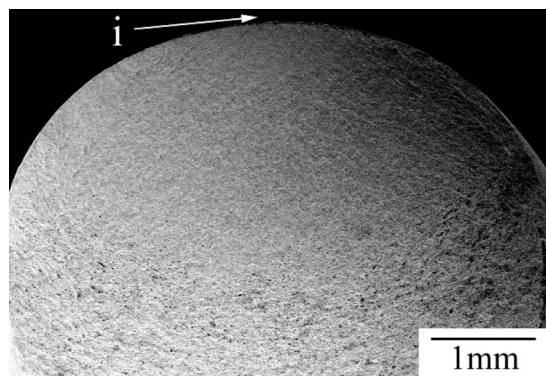
(b)

圖 5. AISI 347 不銹鋼不同幾何形狀試棒在 (a) 3.5% NaCl 及 (b) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 中之  $(\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta\sigma)^{-m_2}$ -N 曲線比較圖 (箭頭表示該點之試棒未斷)

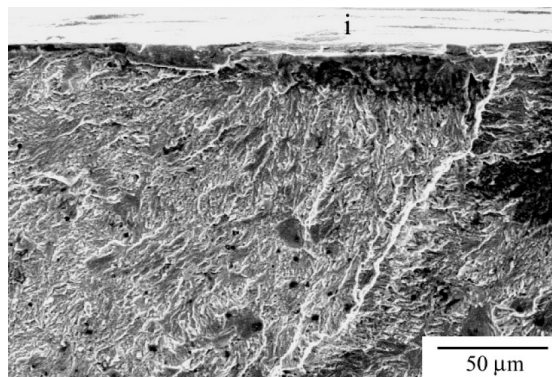
Fig.5  $(\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta\sigma)^{-m_2}$ -N curves for AISI 347 stainless steel with various specimen geometries in: (a) 3.5% NaCl and (b) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. (Arrows designate runout tests.)

圖 6. AISI 347 不銹鋼不同幾何形狀試棒在 (a) 3.5% NaCl 及 (b) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 中之  $(\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta\sigma)^{-m_2} (V_{95})^{-m_3}$ -N 曲線比較圖 (箭頭表示該點之試棒未斷)

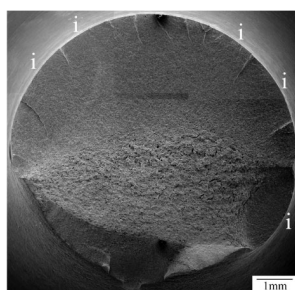
Fig.6  $(\sigma_{\max})^{m_1} (\Delta\sigma)^{-m_2} (V_{95})^{-m_3}$ -N curves for AISI 347 stainless steel with various specimen geometries in: (a) 3.5% NaCl and (b) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. (Arrows designate runout tests.)



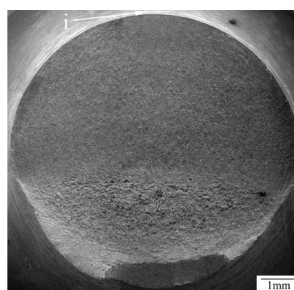
(a)



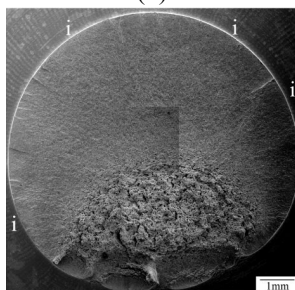
(a)



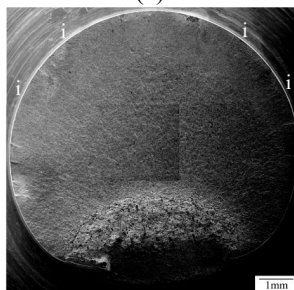
(b)



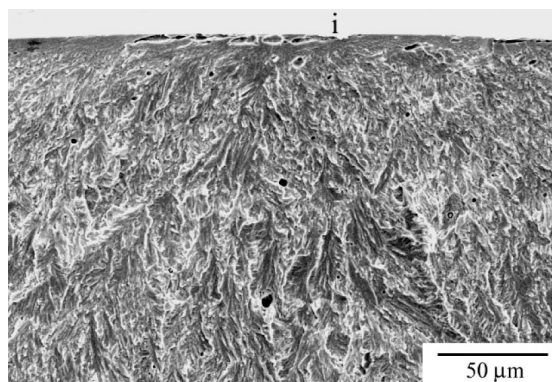
(c)



(d)



(e)



(b)

圖7. AISI 347 不銹鋼在不同形狀試棒中之破斷面全景 (a) smooth、(b) semi-circular, 400 MPa、(c) semi-circular, 325 MPa、(d) v-notch, 300 MPa 及 (e) v-notch, 200 MPa. (i: 裂縫起始處)

Fig.7 SEM fractography of AISI 347 stainless steel tested in air with various specimen geometries: (a) smooth, (b) semi-circular, 400 MPa, (c) semi-circular, 325 MPa, (d) v-notch, 300 MPa, and (e) v-notch, 200 MPa. (i: crack initiation site)

圖8. AISI 347 不銹鋼 (a) 半圓形及 (b) V 形凹槽試棒在 3.5% NaCl 中之高週疲勞破斷面. (i: 裂縫起始處)

Fig.8 SEM Fractography of AISI 347 stainless steel tested in 3.5% NaCl: (a) semi-circular and (b) v-notch specimen. (i: crack initiation)