

## 英高鎳 600 管件表面應力腐蝕裂縫製作探討

余明昇<sup>1,\*</sup>、張靜<sup>2</sup>

The Production of SCCs on External Surface of Inconel 600 Tubings

Ming Sheng Yu<sup>1,\*</sup> and Jing Chang<sup>2</sup>

### 摘 要

壓水式反應器核能電廠的蒸汽產生器管束是電廠重要的壓力邊界，而管束狀態的掌握是電廠老化管理重要的一環，因此必須定時執行非破壞檢測；然而現階段在電廠普遍應用的渦電流檢測法，尚有其檢測的門檻值和評估裂縫深度的不準度。為了提昇渦電流檢測的技術，必須於實驗室利用嚴苛的環境，於管件表面製作應力腐蝕裂縫，以為比對裂縫深度之用。

在此實驗中應用不同的構想和組裝，使英高鎳 600 管件試樣表面分別有較大之圓周向或軸向負荷，以便在嚴苛的環境中分別產生軸向或圓周向之應力腐蝕裂縫。所使用的腐蝕環境為 280°C 的 40% NaOH + 300 g/l Cu<sub>2</sub>O 混合溶液。測試結果顯示裂縫生成的數目、裂縫長度和測試時間並沒有一定的關係，然最深裂縫深度和時間有成正比例之關係。但因所生的裂縫並非在特定位置，且在同一位置處並非唯一之裂縫，因此渦電流檢測信號會產生干擾的現象。在此利用 PTFE 塗覆的有無，可以成功的解決所遭遇的問題。

關鍵詞：英高鎳 600 合金；應力腐蝕裂縫。

### ABSTRACT

Since steam generator tubings is a primary pressure boundary for PWR reactor, so that their service status is an important factor for aging management of power plant, especially for aging ones. Nondestructive inspection intermittently being conducted is a necessary measure to provide enough and valuable information to keep them intact through taking appropriate actions. However, eddy current inspection, currently most popular and effective method, could not provide good inspection reliability and sizing accuracy. For improving inspection techniques, defected tube with stress corrosion cracking on the outer surface should be prepared from laboratory by means of severe caustic environments. Therefore, the correlation of inspection signal and configuration of cracking will be established.

---

1 行政院原子能委員會核能研究所  
Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council

2 台灣電力公司核能發電處  
Nuclear Operation Department, Taiwan Power Company

\* 連絡作者 (TEL: 02-82317717 Ext. 6752)

In this study, in order to produce both axial and circumferential SCC on external surface of Inconel 600 tubings, an appropriate setup or facility, which offers high enough circumferential or axial stress to tube specimens, is required. In here, a severe caustic environment of 40% NaOH + 300 g/l Cu<sub>2</sub>O was used. Test results showed that the produced cracking, such as their numbers, length or even their depth, did not establish any correlations with testing periods. But the maximum depth of produced cracking, irrespective axial or circumferential SCC, was proportion to testing time. However, the produced cracks are not located at one specific region and are too concentrated to identify each specific parameter using eddy current inspection, then the improvement of production of one crack at a definite region is developed. The coating of PTFE on outside surface of tube specimens can overcome this problem.

Key words: Inconel 600 alloys; Stress Corrosion Cracking.

## 一、前言

蒸汽產生器的管束在壓水式反應器核電廠中，扮演著熱交換之功能；由於支撐或限制流水等之需求，整體構造除了管束外，還有管板、支撐板等結構。因而管束外表面和管板、支撐板會形成隙縫，加之水流不均使得冷卻效應不一，造成隙縫中化學物質有濃縮的現象，因此外管壁容易產生二次側應力腐蝕龜裂 (Outside -Diameter Stress Corrosion Cracking ODSCC)。然而目前在電廠最普遍使用的管束非破壞檢測方法為渦電流檢測法，但由於實務執行面和檢測原理仍然有些許落差，因此依然有檢測門檻值限制以及裂縫深度評估精確度之問題；因此對於具有可靠且精確的渦電流檢測技術之需求，顯得益發迫切。若此，則不致造成高估淺裂縫的深度因而過早塞管減少蒸汽產生器壽命或是低估裂縫深度而發生運轉中產生一次側水洩漏的的意外。

再者，根據美國 Nuclear Energy Institute Initiative (NEI) 在 1997 年和各個供電公用事業單位達成的共識，所有蒸汽產生器現場檢測的人員或技術，都必須通過能力驗證 (performance demonstration, PD) 之資格。所謂能力驗證就是說技術執照的評定是針對各種單一型態及模式 (single type-and-mode) 的劣化管件試樣，確定檢測的可靠度以及裂縫尺寸大小評估之精確度，並從量測結果評估現場檢測的資格。然而欲達成提昇蒸汽產生器管束非破壞檢測技術的目標，諸如檢測的校準標準、檢測的

程序、檢測的設施和檢測數據的擷取和分析評估等的改進，都需要有一系列的劣化管件試樣，作為能力驗證之用途。然而依據目前 ASME 所使用的或一般廠商所採用放電加工 (Electro -discharge machining EDM) 製作的標準試樣，由於裂縫的型態及尺寸大小和實際的應力腐蝕龜裂有所不同，所建立的校準曲線，仍未能滿足於渦電流檢測技術的可靠度或尺寸精確值，因此具備一組劣化深度不一之二次側應力腐蝕龜裂管件試樣是必要的。

此外，當二次側應力腐蝕龜裂裂縫已存在後，其後續成長問題的探討一直是較欠缺的。這裏頭包括長度、深度各自的成長率以及裂縫型態成長的過程，這些數據和現象都是假設管束有劣化存在時，評估其結構安全和剩餘壽命的重要依據。雖然早期量測裂縫成長速率，所採用的 CT (Compact Tension) 試片或 DCB (Double Cantilever Beam) 試片，可獲得裂縫成長速率和環境參數的關係，但並未能實際模擬二次側環境條件下劣化管件試樣的裂縫成長行為或者量測較可靠的裂縫成長率，都顯示必須有劣化管件試樣作為起始試樣以供測試。根據上述論點可知，無論是欲提昇非破壞檢測的技術，還是欲研究和探討二次側應力腐蝕龜裂裂縫存在時其成長的行為，都必須具備含有應力腐蝕龜裂裂縫的管件試樣，然而欲從運轉或退休中的蒸汽產生器，取得具有服役所產生的應力腐蝕龜裂裂縫管件試樣，是相當困難且費用非常昂貴的工作。因此有必要利用實驗室設施，在嚴苛的腐蝕環境下以加速的方式製

作二次側應力腐蝕龜裂裂縫，以為後續的研究之用。

## 二、實驗之管材

實驗中所使用的管材為外徑 11/16 英吋、壁厚則為 0.04 英吋的英高鎳 600 合金無縫管材，熱處理編號為 NX79931632，其組成成分與機械性質如表 1 所示。將此採購之英高鎳 600 管材切片，並以 5% Nital 溶液 (5ml 硝酸 + 95ml 甲醇) 作為電解浸蝕液，而電解腐蝕條件為室溫、3V 的電壓，電解腐蝕時間約 45 秒至 1 分鐘。電解腐蝕後再以光學顯微鏡觀察其金相結構，晶粒大小相當於 ASTM 編號 6.6，其顯微組織如圖 1 所示。隨後有些英高鎳600管材試樣，和導線接觸後一起冷鑲埋，並研磨至 1200 號砂紙以上，以 Modified double-loop EPR<sup>[1,2]</sup> 測試其敏化程度，結果顯示  $I_p/I_a = 0.88$ ，敏化程度並非很高。

## 三、裂縫製作概念和方法

### 1、軸向二次側應力腐蝕裂縫製作

欲在管件試樣外表面產生二次側軸向 SCC 裂縫，除了管件必須置於極嚴苛的腐蝕環境外，還得給予較大的圓周向應力 (circumferential stress) 方能產生。為了滿足此項要求，根據 Takamatsu 等人<sup>[3,4]</sup> 所採用的靜止溶液法，即利用管材內外壓差或溫差作為產生軸向 SCC 裂縫的方法。將管樣試件之外管壁置於 40% NaOH + 300g/l Cu<sub>2</sub>O 強鹼溶液中，並於高溫高壓槽內將溶液加熱至 280°C，而壓力則保持在飽和蒸汽壓 (約 500psi) 的條件；而管內則用去離子水以高壓泵和回壓調壓器 (back pressure regulator) 維持至少 2000psi 的條件，整個製作二次側軸向 SCC 裂縫的實驗設施示意圖如圖 2 所示。在此測試條件下，可以假設一個管壁較厚的圓筒，在其管壁內外表面雖有不同的壓力，但是都處於均勻的壓力條件下；至於管內外之溫度則假設因金屬導

熱效能高，致內外溫差只有 5 度，如此根據彈性力學理論所計算之壓差應力以及溫差所產生之熱應力，顯示管壁外側會產生圓周向拉伸應力約 9 Ksi，以及軸向拉伸應力約 3 Ksi；可知在此工作條件下比較容易產生軸向的二次側應力腐蝕裂縫。

### 2、圓周向二次側應力腐蝕裂縫製作

為了製作圓周向二次側 SCC 裂縫，外管壁除了需要處在嚴苛的環境中外，還必須施以較大的軸向應力方能產生。在此利用製作軸向人工裂縫相同的工作環境，但將施力的方向改為軸向應力為主要的概念。首先將管件試樣兩端封焊同質材料的螺紋端塞，再予螺帽鎖緊固定於支架上並藉螺帽鎖緊不同的程度，代表不同的受力程度。然後將整個支架和施加拉力的管件試樣置於靜態的 40% NaOH + 300g/l Cu<sub>2</sub>O 強鹼溶液中，處理不同的時間，如此據信可得到不同的二次側 SCC 裂縫特徵。整個的設計和安裝概念，其示意圖情形如圖 3 所示。

## 四、結果和討論

在軸向二次側應力腐蝕裂縫製作的過程中，為了明白管件試樣在強鹼溶液中但不同的處理時間下，和產生裂縫的數目、裂縫的長度或裂縫的深度有否關係，以便日後製作標準管件試樣時，更能掌握實驗的績效以節省成本，在實驗中共測試了數種不同的時間，以為比較。軸向裂縫製作的結果，一般都以圖 4 為典型的代表，即二次側軸向裂縫的產生會沿著外管壁圓周向不同的方位、距管件試樣尾端不同的距離分佈；此外，經過仔細的觀察，顯示不同的測試時間會產生不同裂縫的數目和長度，圖 5 顯示在四個不同測試時間下所產生不同裂縫的外觀情形。綜合結果顯示軸向裂縫產生的數目以及長度和測試的時間並無法歸納出任何相互的關係。至於平均裂縫的深度，由於裂紋數目多、長度也不一致，也不可能剝開每個裂縫量測深度以求得平均裂縫深度，但是最大深度和測試時間的關係，則預期將可

獲得較明確的結果。

為了獲取此結果，首先假設在外管壁觀察到軸向裂縫有最大開口處即是最大裂縫深度產生的地方。依此假設標準在不同的測試時間下，選取各自擁有最大深度的試樣。接著採用適當切割並將裂縫剝開的方式予以觀察破損型態及量測裂縫的最深深度。上述試樣的軸向裂紋破損面上的破損型態大致如圖 6 所示，為典型的沿晶應力腐蝕龜裂 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)。有些樣品由於二次側 SCC 裂縫集中或是太淺因此難以剝離，故直接採用沿著垂直裂縫方向切割，並沿著壁厚方向作金相觀察。剝離的試樣先以光學立體顯微鏡觀察，再輔以 SEM 觀察量測裂縫的最大深度，並確認試樣裂縫剝離處是否足以代表最大深度的疑慮；為了再確認裂縫最深處正確深度值，又將剝離的試樣於最大裂縫深度處作沿壁厚的切割以觀察裂縫的最大深度。在此特別要強調的即是原來所作的假設，即裂縫表面開口最大的地方是最大裂縫的位置是完全正確的。圖7是顯示拋光和浸蝕後金相觀察上述幾個典型試樣裂縫型態和量測裂縫深度的情形。綜合上述試樣的裂縫參數，諸如開口大小，裂縫長度和量測最大深度的結果研判，其中因 SEM 量測裂縫最大深度，可能因取樣拍照角度的不同以致不能獲得精確結果。因此在此處各個裂縫的最大裂縫深度則以表2中金相量測的數值為主。測試時間和量測裂紋的最大深度關係如圖8，可知測試時間和最大深度有比例增加的關係；並且以同樣的測試時間製作劣化管件，其最深裂縫深度約維持在 ( 10 % 壁厚之間。

至於在圓周向二次側應力腐蝕裂縫的製作上，軸向裂縫測試的概念和觀察量測的準則，都同樣的適用。圖 9 顯示管件試樣上所產生典型圓周向二次側應力腐蝕分佈的情形，即二次側圓周向裂縫的產生會沿著外管壁軸向不同位置處產生，但涵蓋不同的方位角度；此外，同樣的亦顯示不同的測試時間會產生不同裂縫的數目和長度，有些裂縫甚且相當的集中。圖 10 顯示在不同測試時間下所產生不同裂

縫的外觀情形。綜合結果同樣顯示軸向裂縫產生的數目以及長度和測試的時間並無法歸納出任何相互的關係。同樣的以外管壁觀察到圓周向裂縫最大開口處即是最大裂縫深度之準則，並將管件上有圓周向二次側應力腐蝕裂縫的試樣，依上節所述試樣切割以及觀察量測方法，同樣的也可獲得裂縫最大深度和測試時間之關係，如圖11所示，可知產生之最深裂縫深度和測試時間亦有比例增加的關係；同樣的，在相同測試時間下最深裂縫深度也維持在 ( 10 % 壁厚之間。

然而所製作的圓周向二次側應力腐蝕裂縫，由於數個不同裂縫如圖 10 顯示除了有些斜外且有過於集中之現象，不易以渦電流檢測法分辨出來，以致所量測之信號是數個裂縫之綜合顯示，故對於建立檢測信號和裂縫之參數有其實質之困難，因此如何在管件試樣定位上，產生唯一的裂縫是另一個挑戰。在此擬定產生圓周向裂縫的位置，先以鐵絲捆綁固定於管件試樣的外管壁上，然後再依塗覆的程序，於整支管件試樣塗覆 PTFE (Polytetra-fluoroethylene) 隔離層。再將鐵絲移除，即可得到如圖 12(a) 所示之管件試樣暴露區及保護區域。隨之即按上述SCC裂縫製作的方法，將管件試樣放於上述的環境條件下進行測試。圖 12(b) 為塗覆 PTFE 的管件試樣，經過不同的測試時間後，取出經清洗後顯示典型之隔離層尚完整的情形，因為一般所知 PTFE 塗覆層在強鹼條件下最高之使用溫度為 260 °C，但在此測試溫度 280°C 下進行約 24 小時的測試，仍然可保持其完整性。隨後經過磨除 PTFE 塗覆層後，可以清楚的觀察到在此位置，有一圓周向連續性或斷續性但不致相互平行的 SCC 裂縫，如圖 13 所示。當然，由於處理時間的差異，並非所有的暴露區都產生圓周向 SCC 裂縫，但在特定位置所產生的圓周向裂縫，都容易分辨且相互間也沒有干擾，應適合於渦電流非破壞檢測，圖 14 顯示圓周向 SCC 裂縫建立的新校準曲線，顯示此法將減低原本以 ASME 標準管件評估裂縫深度的不準度值。

比較軸向和圓周向二次側應力腐蝕裂縫製作的

時間和裂縫最深深度的結果，顯示圓周向的狀況是在較短的時間可以達到相同之最深裂縫深度，主要是施以的負荷應力不同之故；在軸向時根據計算結果顯示圓周向應力約為 9 Ksi，而圓周向時則高達 30 Ksi，足見應力之大小對裂縫起始和成長都有一定之關係。

## 五、結論

根據上述實驗的設計、裝置、測試和結果，可以很明確的說明我們已掌握住在蒸汽產生器熱交換管件外管壁上，製作二次側軸向和圓周向兩種應力腐蝕裂縫的技術。並且從這些實驗中可以獲得下列的結論：

1. 在 40% NaOH + 300g/l Cu<sub>2</sub>O 強鹼溶液中，施加適當的應力方式（軸向與圓周向），可使英高鎳材料產生所需求的二次側應力腐蝕龜裂。
2. 所製作的二次側應力腐蝕龜裂，無論是軸向或圓周向，其裂縫生長的數目和長度並未和測試時間有一定的關係。
3. 所製作的二次側應力腐蝕龜裂，無論是軸向或圓周向，其裂縫最大深度隨著測試時間的增加而成比例的增加。
4. 應用 PTFE 之塗覆以及適當方法準備暴露區，在英高鎳 600 管件試樣上，可在定位上獲得所需之唯一裂縫。

## 五、致謝

本文之得以完成，應誠摯的感謝核研所下列諸君在此研究工作上的貢獻：諸如徐秀北、張文帆和劉健宗等通力合作製作劣化管件試樣，而吳燕輝則有系統且耐心的執行相關之金相觀察，更使工作能夠圓滿達成預定之目標。在此，再次的感謝和祝福。

## 六、參考文獻

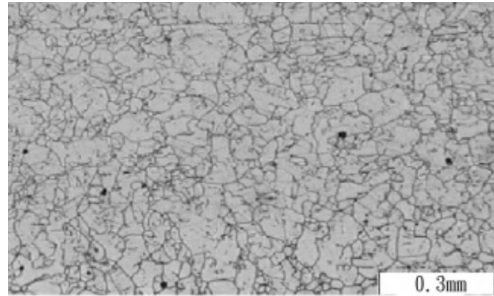
1. M.A. Ahn, H.S. Kwon, and J.H. Lee, Corrosion Science, Vol.51, No. 6 (1995) 441.
2. Y. Tanaka and S. Suzuki, Minutes of the 1998 Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials (IGC-EAC), Vol.2, April 1998, Hangzhou, China, P.aust11.
3. H. Kawamura et al., IGA/SCC Crack Propagation Behavior of Inconel Alloy 600 in High Temperature Water, 7<sup>th</sup> International Symposium on environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems- Water Reactors, Aug. 7-10,1995, Breckenridge, Colorado, p.71
4. H.Takamatsu et al., IGA/SCC Crack Propagation rate measurements on Alloy 600 Steam Generator Tubing Using A Side Stream Model Boiler, 6<sup>th</sup> International Symposium on environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems- Water Reactors, Aug. 25-29,1993, Monterey, California, p.81

表1. 英高鎳 600 合金無縫管之成分及機械性質

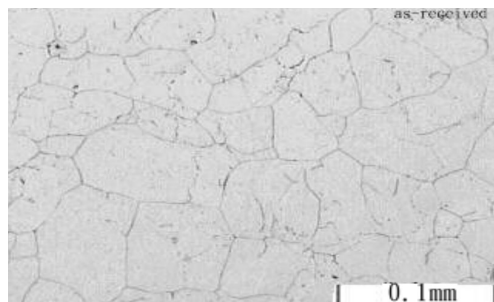
Table 1. Chemical composition and mechanical properties of Inconel 600 tubing.

元素	C	Mn	Si	S	Cr	Cu	Fe	Ni
Wt%	0.04	0.26	0.20	0.001	15.20	0.17	7.82	76.31

Yield Strength (ksi)	Tensile Strength (ksi)	Elongation (%)
47.5	103.6	42.0



(a)



(b)

圖1. 英高鎳 600 合金管材在不同倍率下之金相組織

Fig.1 Microstructures of as received Inconel 600 tubing at different magnifications as shown in (a) and (b).

表2. 金相觀察量測不同測試時間所製作 SCC 裂縫之最大裂縫深度的結果

Table 2. The maximum depth of ODSCC at various testing time was evaluated by optical microscopy.

軸向SCC裂縫			圓周向SCC裂縫		
測試時間 (hr)	最大深度 (mm)	最大深度 (%壁厚)	測試時間 (hr)	最大深度 (mm)	最大深度 (%壁厚)
24	-	0	13	0.30	30
28	-	0	22	0.46	46
32	0.19	19	24	0.51	50
35	0.43	43	26	0.59	58
40	0.57	56	28	0.73	72
64	0.68	67	32	裂穿	100
72	裂穿	100			

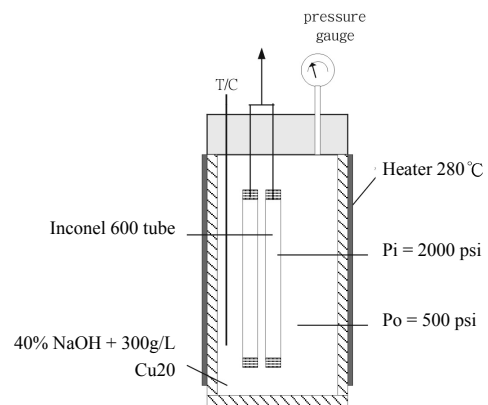


圖2. 二次側軸向 SCC 裂縫製作設施概念示意圖

Fig.2 Schematic diagram of the facility for the production of axial cracks on the outer surface of tubing.

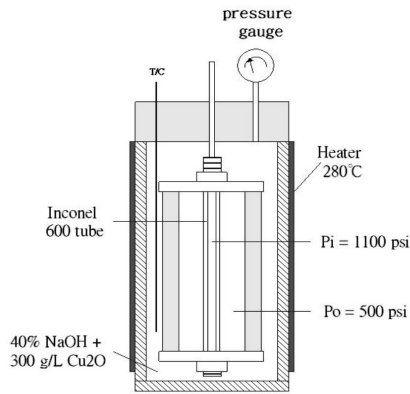


圖3. 二次側圓周向 SCC 裂縫製作設施概念示意圖  
Fig. 3 Schematic diagram of the facility for the production of circumferential cracks on the outer surface of tubing.

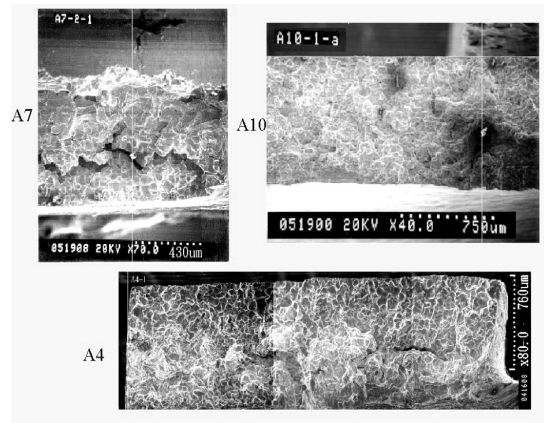


圖6. 二次側軸向 SCC 裂縫破損面 SEM 觀察的結果  
Fig. 6 SEM micrographs of fracture surface on ODSCC.

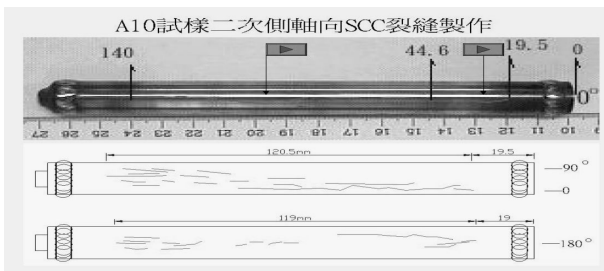


圖4. 典型二次側軸向 SCC 裂縫生長分佈情形  
Fig. 4 Typical photograph and schema showed the distribution of axial ODSCC on the outer surface of tubing.

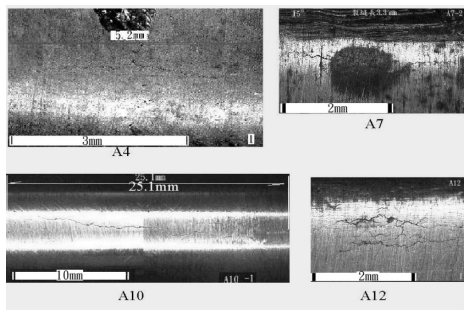


圖5. 不同測試時間所產生各種二次側軸向 SCC 裂縫的情形  
Fig. 5 Micrographs showed the variation of morphology of axial ODSCC produced at various testing time.

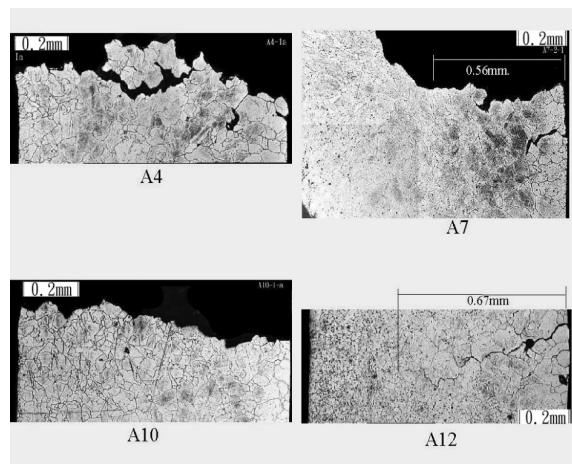


圖7. 以金相觀察及量測二次側軸向 SCC 裂縫之最深度之情形  
Fig. 7 Photomicrographs depicted the measurement of maximum depth of ODSCC at various testing time by means of optical microscopy.

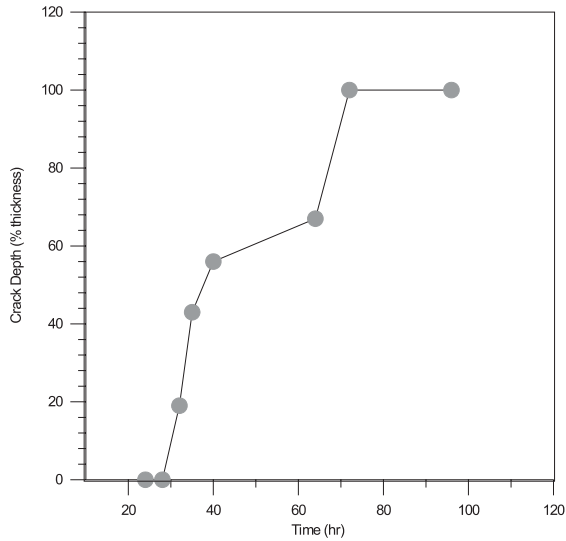


圖8. 二次側軸向 SCC 裂縫最大深度和測試時間之關係，有成比例增加之趨勢

Fig. 8 The maximum depth of axial crack increased with increasing testing time.

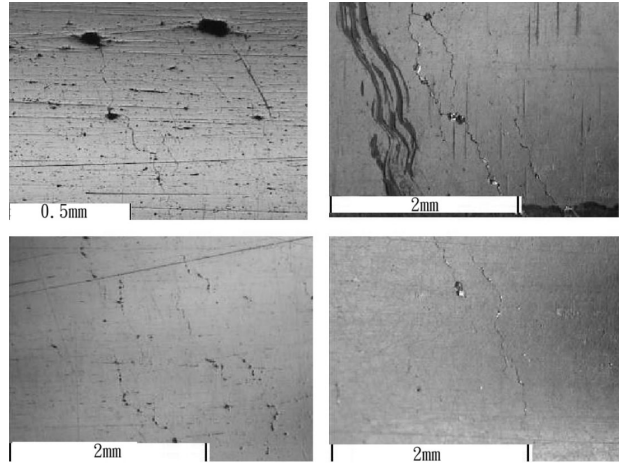


圖10. 不同測試時間所產生各種二次側圓周向 SCC 裂縫的情形

Fig. 10 Micrographs showed the variation of morphology of circumferential ODSCC produced at various testing time.

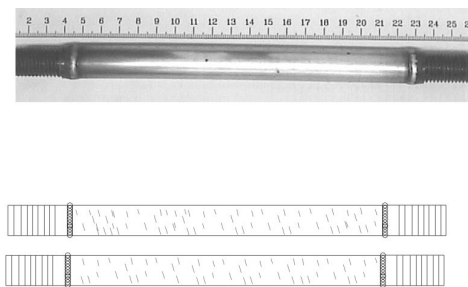


圖9. 典型二次側圓周向 SCC 裂縫生長分佈情形

Fig. 9 Typical photograph and schema showed the distribution of circumferential ODSCC on the outer surface of tubing.

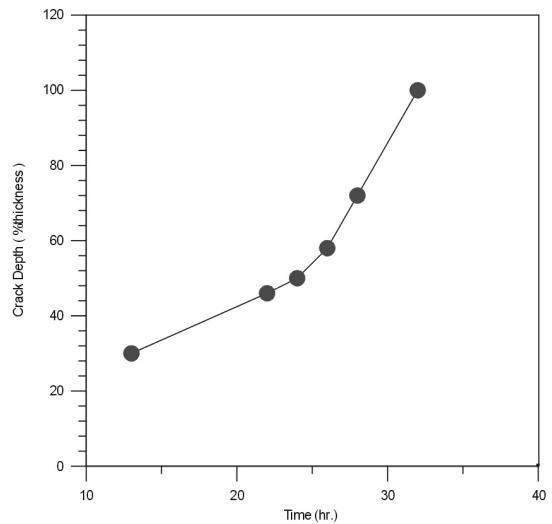


圖11. 二次側圓周向 SCC 裂縫最大深度和測試時間之關係

Fig. 11 The maximum depth of circumferential crack increased with increasing testing time.



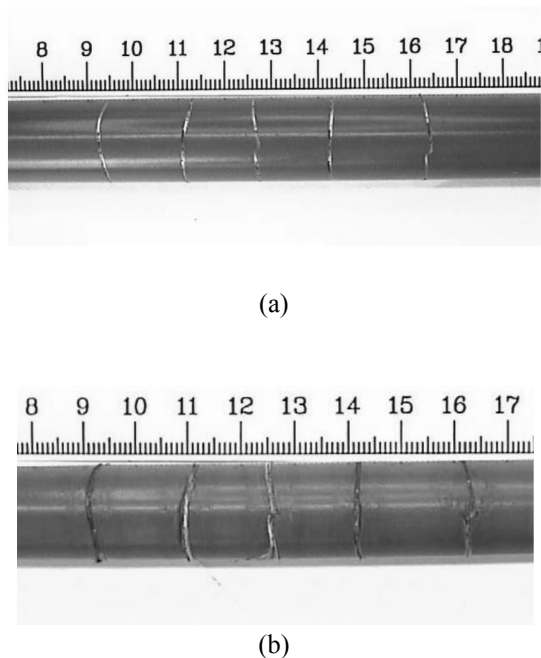


圖 12. 為 PTFE 塗覆於管件試樣之狀況，(a) 為測試前塗覆 PTFE 區域和暴露區，(b) 為測試後 PTFE 仍然存在且具保護作用，而有些暴露區則已產生圓周向 SCC。

Fig. 12 Photographs showed the coating of PTFE on external surface of tubing, (a) before the testing, (b) there was still integrity after testing.



圖 13. 為暴露區內所產生的斷斷續續之唯一裂縫。

Fig. 13 Micrographs showed the only one circumferential cracking on the exposure area of tubing coated with PTFE.

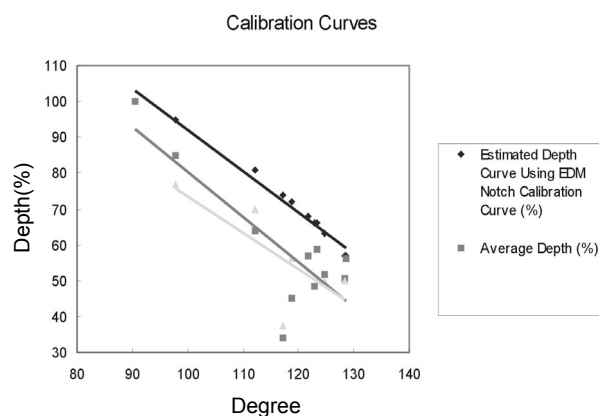


圖 14. 圓周向應力腐蝕龜裂的裂縫實際深度與信號角度所得到的校準曲線

Fig. 14 Calibration curve for circumferential ODSCC revealing the relationship of crack depth with the signal of ETC.