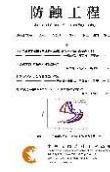




防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.202009\_34(3).0001

## 沃斯田鐵系不銹鋼進行週期性噴灑氯化鎂水溶液的腐蝕行為探討 The corrosion behavior of austenitic stainless steels under periodic spraying magnesium chloride solution

鄭雅云<sup>\*1</sup>、葉宗洸<sup>1</sup>、王美雅<sup>2</sup>

Ya-Yun Cheng<sup>\*1</sup>, Tsung-Kuang Yeh<sup>1</sup>, Mei-Ya Wang<sup>2</sup>

### 中文摘要

本實驗的研究對象為乾貯用沃斯田鐵系不銹鋼，藉由週期性噴灑氯鹽溶液，於不同的溫度條件下進行加速腐蝕實驗，探討沃斯田鐵系不銹鋼在沿海環境中，對氯離子誘發應力腐蝕龜裂的敏感性。

本實驗使用固溶及敏化熱處理之 304、304L、316L 不銹鋼 U-bend 試片，週期性噴灑氯化鎂水溶液，在 40、60、80°C 及固定相對濕度 40% 的結果中，可以發現 304、304L 不銹鋼在 40、60°C 下，表面有觀察到裂縫生成，在 80°C 下以大面積的孔蝕聚合為主要腐蝕型態；316L 不銹鋼在 40、60°C 下裂縫生成數量較少，以孔蝕為主，在 80°C 下則出現較長的裂縫。根據橫截面的觀察結果，往縱深方向擴展的裂縫具有分支特性，為應力腐蝕裂縫，在本實驗中，以敏化 316L 不銹鋼在 80°C 下觀察到的裂縫，具有較大的深度。

**關鍵詞：**乾式貯存筒、沃斯田鐵系不銹鋼、U-bend、氯離子誘發應力腐蝕龜裂。

### Abstract

The research object of this experiment is austenitic iron stainless steels for dry storage system. By periodically spraying chloride solution, accelerated corrosion experiments were conducted under different temperature conditions to investigate the susceptibility of austenitic iron stainless steel to chloride-induced stress corrosion cracking nearby coastal environments. Solution-annealed and sensitization heat-treatments U-bend specimens were applied in this corrosion-accelerated experiment with periodic spraying magnesium chloride solution, and test conditions were set at 40, 60, 80°C with constant relative humidity 40%RH. The test results of 304 and 304L stainless steels indicated an obvious trend was that stress corrosion cracking was almost observed at 40, 60°C and general corrosion was dominant corrosion type at 80°C. For 316L stainless steel, pitting corrosion was dominant

收到日期：108 年 10 月 21 日

修訂日期：109 年 05 月 04 日

接受日期：109 年 08 月 10 日

<sup>1</sup> 國立清華大學工程與系統科學系

<sup>1</sup> Dept. of Engineering and System Science, National Tsing Hua University

<sup>2</sup> 國立清華大學原子科學技術發展中心

<sup>2</sup> Nuclear Science and Technology Development Center, National Tsing Hua University

\*聯絡作者：[yy107011520@gapp.nthu.edu.tw](mailto:yy107011520@gapp.nthu.edu.tw)

corrosion type at 40, 60°C, and stress corrosion cracking was relatively at 80°C. According to the cross-section observation, the cracks observed on 316L stainless steel displayed highly-branched, which indicated the cracks were stress corrosion cracking. In this experiment, the cracks observed on sensitized 316L stainless steel at 80°C showed a largest depth.

**Keywords:** chloride induced stress corrosion cracking; dry cask storage system, austenitic stainless steel; U-bend Test.

## 1. 前言

沃斯田鐵系不銹鋼因為含有鉻元素，抗蝕能力優越並具有良好成形性，因此被廣泛應用於各種工業應用，甚至可用於貯存高放射性的用過核子燃料，即核電廠乾式貯存系統中密封鋼桶的候選材料，如 304、304L、316L 不銹鋼。臺灣為海島型國家，本身氣候條件為相對濕度高，而核電廠為了方便取得冷卻水選擇建置於海岸邊，乾式貯存設施場址設於核電廠內，在氯離子及水氣充足的環境下，密封鋼筒表面會有溶膠態的鹽類薄膜沉積，滿足應力腐蝕龜裂的生成要素——足夠的張應力、敏感性材料及腐蝕性環境，將引發氯離子誘發應力腐蝕龜裂（chloride-induced stress corrosion cracking, CISCC）的生成。此外，氯離子的環境容易使不銹鋼發生局部性腐蝕的情形，如孔蝕等。以上提及的兩種腐蝕型態，都能以很小的質量損失造成材料破損，且都難以進行偵測。

根據 ASTM 規範的模擬海水成分，氯化鎂（ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ）含量僅次於氯化鈉（ $NaCl$ ）。而鋼筒表面沉積之氯離子濃度取決於由溫度及相對濕度，這些環境因子環環相扣並且都受到氯鹽種類的影響。氯化鎂在很大的溫度範圍內是穩定的氯化鎂水合物，且潮解濕度約 33%<sup>[1]</sup>，而氯化鈉的潮解濕度約為 75%，相較之下，氯化鎂在很大的溫度範圍內皆可完全潮解，若環境的相對溼度越接近氯鹽之潮解濕度，會引發越嚴重的氯離子誘發應力腐蝕龜裂，因此在低溫環境下最具侵蝕性的氯鹽為氯化鎂<sup>[2-5]</sup>。

然而乾式貯存系統是用來存放用過燃料池中已貯存多年的用過核燃料，這些用過核燃料相較

於其他低放射性廢棄物仍具有較高的放射性，故必須確保在運轉年限內的結構完整性，根據過往的研究，較多文獻著力於探討沃斯田鐵系不銹鋼的弱化機制、材料表現，及發生應力腐蝕龜裂的閾值探討。本實驗將著重在不同實驗環境下，利用較嚴苛的氯鹽沉積量進行加速腐蝕試驗，探討 304、304L 及 316L 不銹鋼的腐蝕情形，以保守性地取得三種不銹鋼在不同環境條件的腐蝕行為，進而評估密封鋼筒在使用年限內的結構完整性。

## 2. 實驗方法

### 2.1 實驗設置

本實驗的實驗流程如圖 1 所示，針對常使用於密封鋼桶之沃斯田鐵系不銹鋼 304、304L、316L 不銹鋼進行測試。將板材加工車削為 ASTM 規定之平板狀試片後，利用特殊製具彎折成 U-bend 形狀，並加裝夾具以維持固定之張應力。三種不銹鋼材料分別有兩種熱處理條件，為固溶及敏化熱處理，熱處理條件列於表 1。為了模擬沿海環境中的氯鹽沉積情形，以四天為週期進行氯化鎂水溶液噴灑，實驗裝置圖如圖 2，利用恆溫儀及加濕裝置來調控腔體內的溫度及相對濕度，實驗條件如表 2 所示，主要改變的環境參數為溫度——40、60、80°C，相對濕度固定為 40%。實驗條件的設置參考了核一廠第一期乾貯的安全分析報告<sup>[6]</sup>，可以得知在原始熱負載為 12.3kw 的條件下，密封鋼筒表面的起始溫度位於 77 至 120°C，然而實際上乾貯筒的熱負載約為表中數值的二分之一，且考量到溫度隨著時間逐年遞減的同時，密封鋼筒表面的相對濕度也逐年增加，當相對溼度大於鹽

沃斯田鐵系不銹鋼進行週期性噴灑氯化鎂水溶液的腐蝕行為探討

類潮解所需之相對濕度，發生應力腐蝕龜裂的機率將大幅提升，因此本實驗設置了 40、60、80°C

及相對濕度 40%，以確保本加速腐蝕實驗可以取得足夠保守的實驗結果。

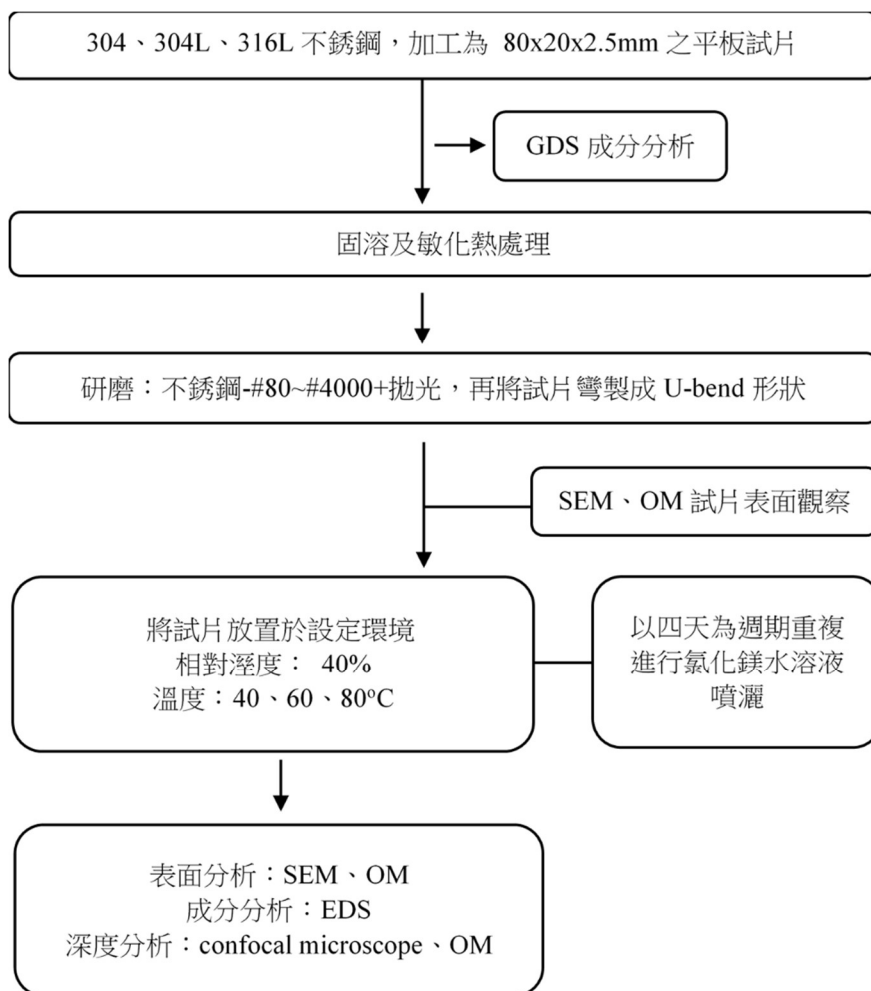


圖 1 實驗流程圖。

Figure 1 Experimental flowchart.

表 1 熱處理條件。

Table1 Heat-treatment conditions.

材料種類	固溶熱處理			敏化熱處理			
	溫度	時間	冷卻方式	溫度	時間	冷卻方式	
304不銹鋼	1050°C	升溫2小時 持溫40分鐘	水淬	650 °C	升溫1小時	持溫24小時	爐冷
304L不銹鋼						持溫48小時	
316L不銹鋼						持溫100小時	

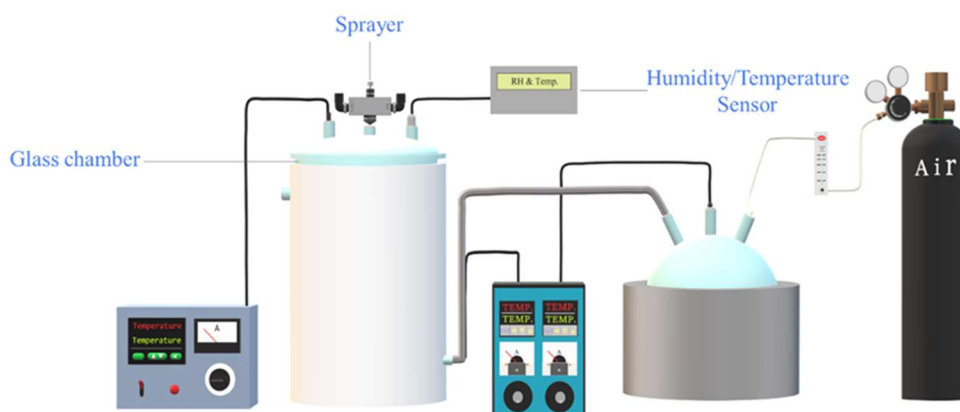


圖 2 實驗裝置示意圖。

Figure 2 Schematic diagram of system for simulating coastal environment at controlled temperature and humidity.

表 2 週期性噴灑氯化鎂水溶液之實驗條件。

Table 2 Test conditions of  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  solution periodic spraying test.

實驗溫度(°C)	氯化鎂水溶液濃度(wt%)	相對溼度(%)
40	3.5 / 1.75 / 0.875	40
60	1.75 / 0.875	
80	1.75 / 0.875	

## 2.2 分析方法

本實驗使用的分析方法有成分分析、敏化程度分析、表面分析、裂縫及孔蝕的深度分析。成分分析主要有 EDX 及 GDS，EDX 用來針對試片表面特定區域進行元素分佈測定，試片材料在實驗之前利用輝光放電儀進行不銹鋼試片之成分分析，本實驗使用的三種不銹鋼成分分析如表 3 所示。

為了確認敏化熱處理試片的敏化程度，本實驗使用三極式電化學系統來進行雙環電位動態極化掃描，測定試片敏化程度。工作電極為敏化熱處理後的 304、304L、316L 不銹鋼平板試片，參考電極為飽和乾汞電極，輔助電極為白金鈦網，測試溶液為  $0.5M H_2SO_4 + 0.01M KSCN$ ，實驗溫度為  $30^\circ C$ ，動態極化掃描速率為  $1.67 mV/s$ 。

表 3 本實驗使用的三種不銹鋼成分分析結果(wt%)。

Table 3 Compositions of 304, 304L, 316L stainless steels analyzed by GDS(wt%).

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Mg
304 不銹鋼	0.03	0.34	1.09	0.03	0.02	8.02	17.86	0.35	0.43	0.07	0.15
304L 不銹鋼	0.02	0.49	1.53	0.03	0.00	8.36	17.96	0.29	0.46	0.06	0.11
316L 不銹鋼	0.03	0.39	1.43	0.03	0.02	12.45	16.79	2.15	0.30	0.04	0.18

本實驗使用 JSM-7610F 熱場發射電子顯微鏡進行表面分析。除了針對裂縫及孔蝕形貌進行定性觀察外，另外使用 AZtec 軟體進行連圖影像拍

攝，拍攝方式以試片中心出發，選定一特定區域，以固定倍率 500、重疊 10% 的形式進行拍攝，連圖總拍攝區域介於  $4.8 - 5.4 mm^2$ ，接著使用 Adobe

Photoshop CS6 影像處理軟體，輸入像素比例，進行裂縫的長度及數目的計算，並使用不同長度區間的裂縫數量來比較試片腐蝕情形。

為了探討孔蝕及裂縫在縱深方向的擴展情形，實驗完成後的試片會使用慢速切割機進行橫截面切割，橫截面研磨並拋光後再使用光學顯微鏡進行觀察。

### 3. 實驗結果與討論

#### 3.1 氯鹽沉積量

為了量化沉積於試片表面上的氯鹽量，本實驗使用 ITO 平板試片，執行相同的週期性噴灑，每 500 小時取出進行重量量測，表 4 的氯鹽沉積量為每 500 小時的平均氯鹽沉積量，由結果可以得知，本實驗中的氯鹽沉積量遠超過應力腐蝕龜裂的最低氯鹽沉積量，且在本實驗所設定的相對濕度 40% 中，氯化鎂會呈現幾乎潮解的狀態，導致不銹鋼表面有較大的氯離子濃度，故在本實驗 40°C 進行 500 小時後，就可以在 304 不銹鋼表面觀察到裂縫的生成。

表 4 每 500 小時內的平均氯鹽沉積量(g/m<sup>2</sup>)。

Table4 Average amount of chloride deposition within each 500 hours(g/m<sup>2</sup>).

氯鹽溶液種類	3.5wt%氯化鎂水溶液	1.75wt%氯化鎂水溶液	0.875wt%氯化鎂水溶液
氯鹽沉積量 (g/m <sup>2</sup> )	17.275	12.375	6.45

#### 3.2 敏化程度分析

為確保所有敏化熱處理可使不銹鋼試片達到重度敏化，遂進行 DL-EPR 量測其敏化程度，其極化掃描結果如圖 3，以敏化 304 不銹鋼為例，

將逆向掃描（正電位掃至負電位）所得之電流密度值（ $i_{r,304SEN}$ ）除以正向掃描（負電位掃至正電位）所得之電流密度值（ $i_{a,304SEN}$ ）乘 100%，即可得知該 304 不銹鋼試片的敏化程度（DOS%），本實驗經過敏化熱處理的三種不銹鋼之敏化程度結果整理於表 5，可由結果得知 304 達到重度敏化，304L 不銹鋼雖然為低碳不銹鋼，但經過 48 小時的敏化熱處理，也達到重度敏化。而 316L 不銹鋼因為碳含量較低，故敏化程度略低於 304 及 304L 不銹鋼，即使經過 100 小時的敏化熱處理後僅達到中度敏化。敏化熱處理試片在圖表中標記為 SEN，固溶熱處理試片則為 SA。

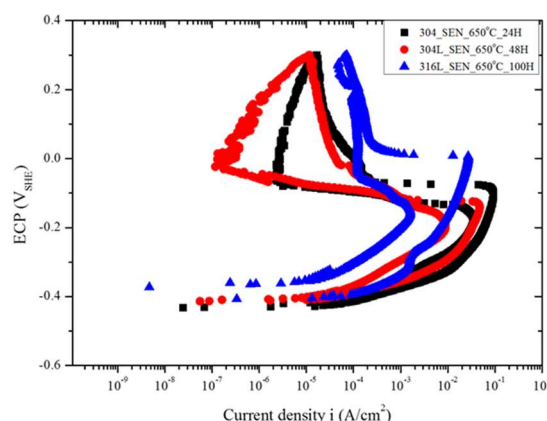


圖 3 304、304L、316L 不銹鋼試片 DL-EPR 結果。

Figure 3 The results of DL-EPR tests for 304, 304L and 316L stainless steels specimens.

表 5 304 304L 316L 不銹鋼試片敏化程度。

Table5 The degree of sensitization for 304, 304L, 316L stainless steels specimens.

材料	敏化程度(DOS)
304 不銹鋼	37.9 %
304L 不銹鋼	19.5 %
316L 不銹鋼	5.8 %

#### 3.3 腐蝕行為探討

圖 5 至圖 7 為三種沃斯田鐵系不銹鋼於不同

實驗條件下的表面形貌分析及橫截面觀察，以下針對熱處理及溫度對沃斯田鐵細不銹鋼腐蝕行為的影響進行探討。

### (1) 熱處理的影響

熱處理對 304 與 304L 不銹鋼的影響相近，固溶 304 及 304L 不銹鋼在 60C\_0.875 條件下觀察到裂縫的生成，主要從局部性腐蝕區域的邊緣向外擴展，且在 60C\_1.75 的條件下，固溶 304L 不銹鋼出現寬度較大的裂縫生成，但是這些裂縫尚未聚合，不具有連續性；敏化 304 SS\_SEN 及 304L SS\_SEN 則觀察到沿晶腐蝕及沿著滑移帶擴展的裂縫，具有連續性，裂縫長度較長。80°C 的實驗結果中，304 SS\_SA 及 304 SS\_SEN 都以大面積的孔蝕接合及局部性腐蝕為主，腐蝕型態沒有顯著的差異，故在此不探討 80°C 的結果。

熱處理對 316L 不銹鋼的影響，主要在於沿晶腐蝕的發生與否。固溶 316L 不銹鋼的腐蝕型態多為孔蝕，在較高的溫度下才會在表面觀察到裂縫的生成，且多為穿晶的型態；敏化 316L 不銹鋼的腐蝕型態多為沿晶腐蝕，在較高的溫度下才會出現長度較長的沿晶腐蝕裂縫，如圖 7 所示，造成此結果的可能原因為 316L 不銹鋼敏化程度較低，使沿晶腐蝕在 316L 不銹鋼表面擴展速率較慢。

比較三種不銹鋼的橫截面觀察結果，僅有在敏化 304 不銹鋼的橫截面觀察到顯著的沿晶腐蝕，甚至出現晶粒腐蝕的現象；兩種熱處理的 304L 及 316L 的橫截面觀察結果中，則沒有明顯的差異。

### (2) 溫度的影響

此小節針對本實驗主要改變的環境參數——溫度進行探討，由 SEM 的影像觀察結果，可以概略地歸納出不同材料在不同溫度下的主要腐蝕型態，如表 6 所示。從圖 5 及圖 6 可以發現，304 及 304L 不銹鋼的腐蝕型態在 80°C 發生了改變，在試片表面沒有發現裂縫的生成，而是以大面積的孔蝕聚合為主。在 80C\_1.75 的條件下，除了孔

蝕聚合的情形，還會發生腐蝕產物剝落造成基材表面的損傷，出現如圖 5 (1) 紅色圓圈的深色區域，利用 EDX 針對該區域進行成分分佈分析，結果如圖 4，SEM 影像中的右上方有一腐蝕產物生成（區域 A），主要為氧的訊號，相鄰的深色區域（區域 B）也有氧元素的訊號，還有鐵、鉻的訊號，相較於影像中左下角未發生腐蝕的不銹鋼基材區域（區域 C），主要為鐵及鉻的訊號，氧的訊號微乎其微，因此可以得知中間的深色區域原為氧化物覆蓋的區域，由殘留的氧訊號判斷該區域已發生腐蝕的情形。

從橫截面的觀察結果，也可以明顯地觀察到溫度對不銹鋼腐蝕型態的影響。以 304 不銹鋼的實驗結果，在 40°C 及 60°C 的結果中，兩種熱處理的 304 不銹鋼都觀察到裂縫，且具有高度分支的特性，符合應力腐蝕龜裂的裂縫形貌，其中在固溶 304 不銹鋼觀察到的裂縫沒有很多曲折，故初步地判斷可能為穿晶應力腐蝕裂縫，敏化 304 不銹鋼中則可以看到在裂縫的前端寬度較大，且沒有明顯的分支現象，故推測此區段為表面的孔蝕往縱深方向進行擴展，隨後誘發應力腐蝕龜裂，因此在該裂縫的後半段出現分支狀的應力腐蝕裂縫，此外，還可以發現伴隨有沿晶腐蝕的現象。

304L 不銹鋼的橫截面觀察結果可以得知溫度對 304L 不銹鋼腐蝕型態的影響與 304 不銹鋼的結果相近。在 60°C 的結果中，以固溶 304L 不銹鋼觀察到的裂縫深度較大，為 1800 $\mu\text{m}$ ，從形貌觀察中可以發現該裂縫寬度較寬；此外，在此條件下觀察到的裂縫深度大於 304 不銹鋼的結果，推測可能的原因為，裂縫在基材中的擴展方向並非單一方向，且沿晶腐蝕的裂縫通常具有較多的轉折處，故在 304 不銹鋼觀察到的裂縫可能並非該裂縫的最大深度。

值得注意的是，在 80°C 下，304 及 304L 不銹鋼都沒有出現往縱深方向擴展的孔蝕及裂縫，此

結果與表面形貌的觀察相符，推測可能的原因為，在此溫度下，不利於 304 及 304L 不銹鋼的鈍態膜發生再鈍化，造成孔蝕在表面多個位置迅速地起始，最後形成均勻腐蝕的形貌。

316L 不銹鋼在三種溫度下的腐蝕行為都有所差異，在 40°C 的結果中，316L 不銹鋼的表面及橫截面僅觀察到孔蝕及沿晶腐蝕的現象，其中以敏化 316L 不銹鋼觀察到的孔蝕深度較大。隨著溫度提高，316L 不銹鋼表面開始有裂縫生成，且在橫截面可以觀察到孔蝕的底部有裂縫往深處擴展，其中 316L SS\_SEN 在 60C\_1.75 還可以觀察到應力腐蝕裂縫。80°C 的結果中，316L 不銹鋼的腐蝕

型態主要以應力腐蝕龜裂為主，裂縫分支方向性多且長度更長，此外還可以觀察到孔蝕與裂縫聚合形成寬度較大的裂縫，推測造成此現象的原因為 316L 不銹鋼含有鉬元素，具有相對穩定的鈍態膜，其他區域在此條件下仍不易發生腐蝕，然而本實驗中的 316L U-bend 試片，在尚未進行加速腐蝕實驗前就可以觀察到夾雜物造成的裂開現象，裂開現象在 80°C 及氯化鎂的加成作用下，腐蝕現象加劇，除了生成較長的裂縫外，也引發孔蝕沿著裂縫進行擴展，最後形成寬度較大的裂縫，如圖 7 (j)、(1)。

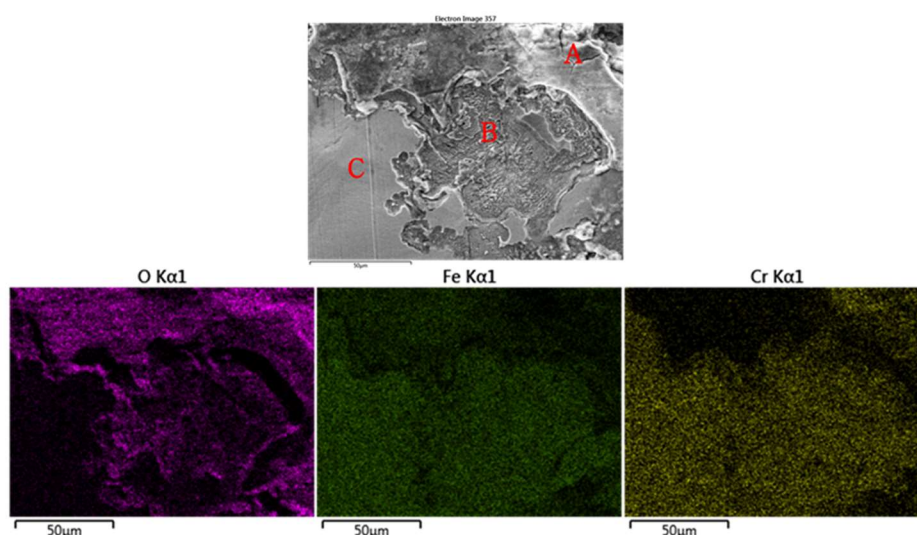


圖 4 304 SS\_SA 於 80°C，1500 小時實驗後試片之 SEM 與 EDX 成分分析結果。  
Figure 4 SEM image and EDX analysis of 304 SS\_SA specimen at 80°C after 1500 hours.

表 6 304、304L、316L 不銹鋼試片於不同溫度中的主要腐蝕型態。

Table6 Dominant corrosion behaviors of 304, 304L and 316L stainless steels at different test temperatures.

材料/實驗溫度	40°C	60°C	80°C
304 SS_SA	裂縫	裂縫	均勻腐蝕
304 SS_SEN	裂縫	裂縫	均勻腐蝕
304L SS_SA	裂縫或孔蝕	裂縫	均勻腐蝕
304L SS_SEN	裂縫或孔蝕	裂縫	均勻腐蝕
316L SS_SA	孔蝕	孔蝕及裂縫	裂縫
316L SS_SEN	孔蝕及沿晶腐蝕	孔蝕及裂縫	裂縫

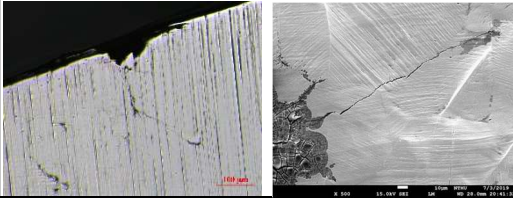

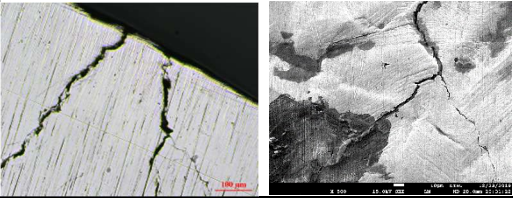

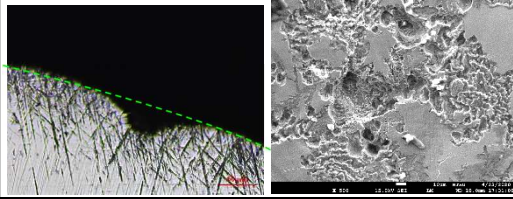
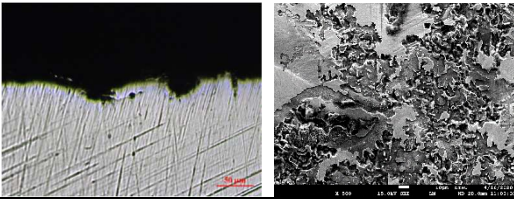
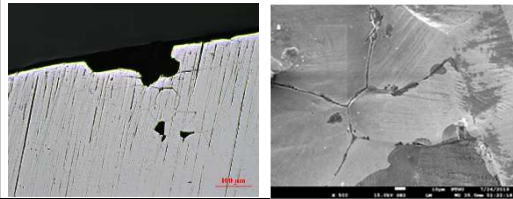
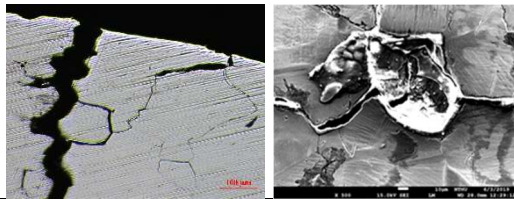
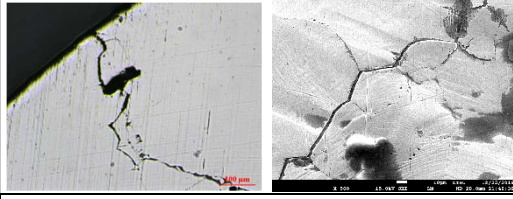
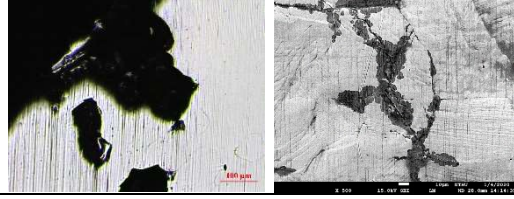
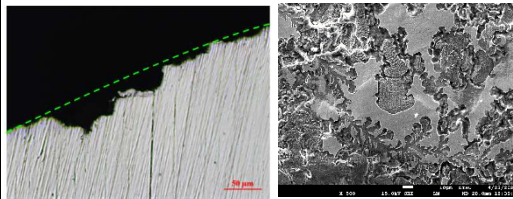
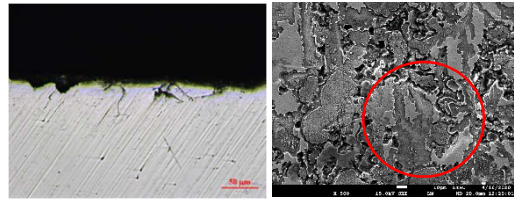
Material	304 SS_SA	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(a)40C_0.875 	(b)40C_1.75 
60°C	(c) 60C_0.875 	(d)60C_1.75 
80°C	(e)80C_0.875 	(f)80C_1.75 
Material	304 SS_SEN	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(g) 40C_0.875 	(h)40C_1.75 
60°C	(i) 60C_0.875 	(j)60C_1.75 
80°C	(k)80C_0.872 	(l)80C_1.75 

圖 5 304 不銹鋼在不同實驗條件下的橫截面觀察。

Figure 5 Cross-section observation of 304 stainless steel specimens under different test conditions.



沃斯田鐵系不銹鋼進行週期性噴灑氯化鎂水溶液的腐蝕行為探討

Material	304L SS_SA	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(a)40C_0.875 	(b)40C_1.75 
60°C	(c) 60C_0.875 	(d)60C_1.75 
80°C	(e)80C_0.875 	(f)80C_1.75 
Material	304L SS_SEN	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(g)40C_0.875 	(h)40C_1.75 
60°C	(i) 60C_0.875 	(j)60C_1.75 
80°C	(k)80C_0.875 	(l)80C_1.75 

圖 6 304L 不銹鋼在不同實驗條件下的橫截面觀察。

Figure 6 Cross-section observation of 304L stainless steel specimens under different test conditions.


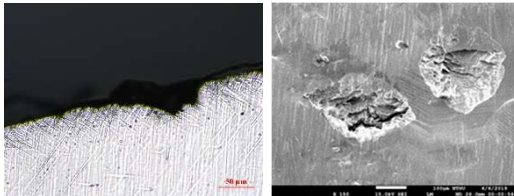
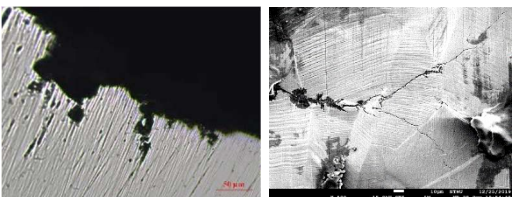
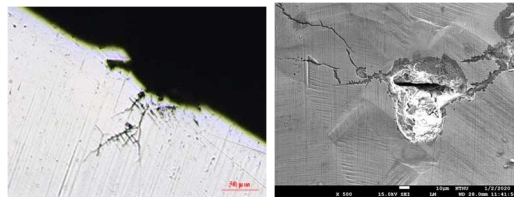
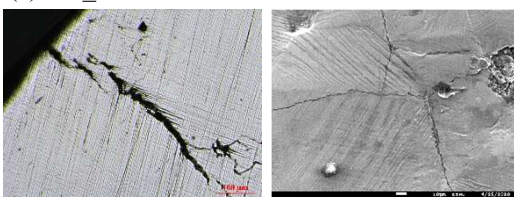
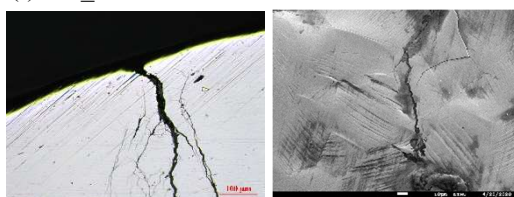
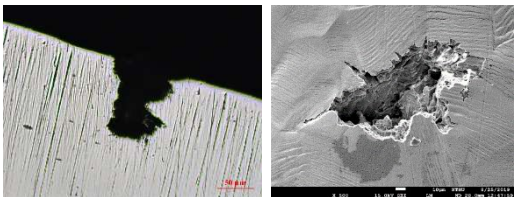
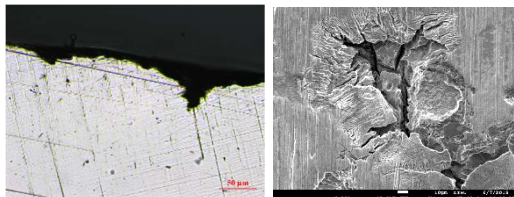
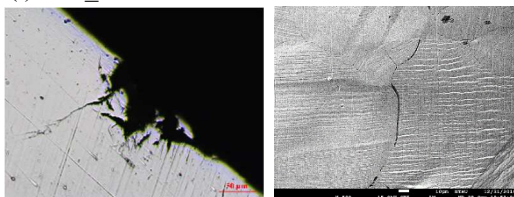
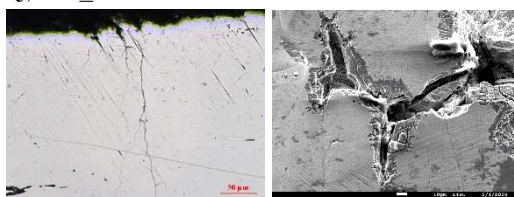
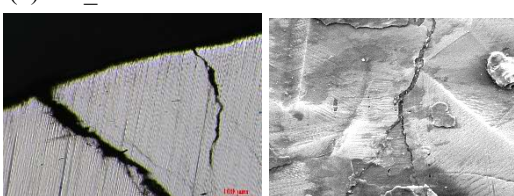
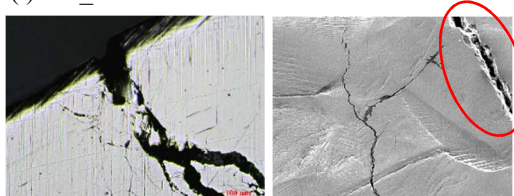
Material	316L SS_SA	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(a)40C_0.875 	(b)40C_1.75 
60°C	(c) 60C_0.875 	(d)60C_1.75 
80°C	(e)80C_0.875 	(f)80C_1.75 
Material	316L SS_SEN	
Conditions	0.875wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)	1.75wt% MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O(aq)
40°C	(g)40C_0.875 	(h)40C_1.75 
60°C	(i) 60C_0.875 	(j)60C_1.75 
80°C	(k)80C_0.875 	(l)80C_1.75 

圖 7 316L 不銹鋼在不同實驗條件下的橫截面觀察。

Figure 7 Cross-section observation of 316L stainless steel specimens under different test conditions.

## 4. 結論

本實驗目的為研究乾式貯存筒於沿海環境之腐蝕行為，針對 304、304L、316L 不銹鋼於模擬環境的裂縫形貌及長度進行分析，目前可以得到以下結論：

- (1) 在本實驗中，熱處理的差異主要為，敏化熱處理試片會出現沿晶腐蝕的現象，進而導致表面有較長的裂縫（大於 500 $\mu\text{m}$ ）生成。
- (2) 本實驗所設置的三個溫度中以 40 $^{\circ}\text{C}$ 及 60 $^{\circ}\text{C}$ 的結果較為相近，40 $^{\circ}\text{C}$ 及 60 $^{\circ}\text{C}$ 的結果中，304 及 304L 不銹鋼表面觀察到的腐蝕型態以應力腐蝕龜裂為主，而 316L 不銹鋼在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下，表面觀察到的腐蝕型態以孔蝕為主，60 $^{\circ}\text{C}$ 可以觀察到裂縫生成；80 $^{\circ}\text{C}$ 的結果中，304 及 304L 不銹鋼表面以均勻腐蝕為主，而 316L 不銹鋼以應力腐蝕龜裂為主要腐蝕行為。
- (3) 在本實驗的條件中以相對濕度 40% 溫度 60 $^{\circ}\text{C}$ ，最接近運轉 30 年後的密封鋼筒表面環境條件，因此根據 60 $^{\circ}\text{C}$ 的結果，以 316L 不銹鋼有較好的材料表現，最大裂縫深度為 358.3 $\mu\text{m}$ ，304 及 304L 不銹鋼都有深度大於 1000 $\mu\text{m}$  的裂縫生成。然而在本實驗 80 $^{\circ}\text{C}$ 條件下，304 及 304L 不銹鋼以均勻腐蝕為主，而 316L 不銹鋼以應力腐蝕龜裂為主，因此若使用 316L 作為密封鋼筒的材料，在乾式貯存系統運轉的前期，密封鋼筒溫度較高的情況下，必須謹慎地注意氯鹽沉積情形及相對濕度的變化。

## 參考文獻

- [1] Stockman, Christine, and Charles R. Bryan., "Evaluation of the Frequencies for Canister

Inspections for SCC", No. SAND2016-0905R. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2016.

- [2] T. Prosek, A. Iversen and C. Taxen., "Low Temperature Stress Corrosion Cracking of Stainless Steels in the Atmosphere in Presence of Chloride Deposits. ", Corros. Sci., (2008) New Orleans. LA, Paper No. 08484.
- [3] "Toward Understanding the Effects of Strain and Chloride Deposition Density on Atmospheric Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking of Type 304 Austenitic Stainless Steel Under MgCl<sub>2</sub> and FeCl<sub>3</sub>: MgCl<sub>2</sub> Droplets.", Örnek, Cem, and D. L. Engelberg., Corrosion 75.2 (2019) pp.167-182.
- [4] "Atmospheric pitting corrosion of 304L stainless steel: the role of highly concentrated chloride solutions.", Street, Steven R., et al., Faraday discussions 180 (2015) pp.251-265.
- [5] Albores-Silva, O. E., E. A. Charles, and C. Padovani., "Effect of chloride deposition on stress corrosion cracking of 316L stainless steel used for intermediate level radioactive waste containers." Corrosion Engineering, Science and Technology 46.2 (2011) pp.124-128.
- [6] 施存寬與曾永信，「乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫期末報告，計畫編號：103FCMA001，2014。