

# A516壓力容器用鋼在含NaCl水汽環境的腐蝕行爲

林東和\* 游輝哲\* 開物\* 開執中\*\*

## The Corrosion Behavior of A516 Pressurized Vessel Steel in a Simulated Water Vapor Containing NaCl Environment

D.H. Lin\* H.J. You\* W. Kai\* J.J. Kai\*\*

### 摘要

本研究主要是在探討A516壓力容器用鋼在模擬含NaCl水汽環境，於相對模擬溫度200°C至400°C間的大氣腐蝕行爲；同時，對母材表面採用鍍鹽及未鍍鹽兩種情形，以探討其腐蝕行爲的差異性。研究結果顯示，鍍鹽及未鍍鹽之鋼材的腐蝕動力學在各溫度下皆遵守拋物線定律。且鍍鹽後均較未鍍鹽者快，另外溫度愈高腐蝕速率也愈快。在腐蝕物觀察上得知，腐蝕產物主要是 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 及 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，而 $\text{FeOOH}$ 及 $\text{FeCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 次之。在鍍鹽之母材腐蝕試片的橫截面分析中，發現氯離子在內層聚集，並有往基材侵蝕的現象。

關鍵詞：大氣腐蝕，壓力容器鋼，腐蝕動力學。

### ABSTRACT

The atmospheric-corrosion of the pressurized-vessel steel(ASTM-A516) was studied over the temperature range of 200~400°C in a simulated water vapor containing NaCl environment. The effect of NaCl surface coating (2 mg / cm<sup>2</sup>) on the corrosion kinetics was also evaluated, as compared with those without coating. The results showed that the corrosion kinetics of A516 steel obeyed the parabolic rate law, regardless of temperature and coating. In general, the corrosion rate increased with temperature, and the rates of the steel with NaCl coating are higher than those without coating at all temperature. The corroded scales formed on the steels (with or without NaCl coating) consisted of mostly  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , and minor  $\text{FeOOH}$  and  $\text{FeCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . The chlorine ion was always detected to be located at the interface between the substrate and the interior scales on the steel with NaCl coating, leading to further corrode the substrate, as a consequence of the faster corrosion rate.

Key words: atmospheric-corrosion, pressurized-vessel steel, corrosion rate

\*國立臺灣海洋大學材料工程研究所

Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, 20224, Taiwan.

\*\*國立清華大學工程及系統科學系

Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, His-chu, 300, Taiwan.

## 一、前 言

大氣腐蝕(atmospheric corrosion)是泛指材料在氣相環境中所發生的一種腐蝕現象，其發生主要是因為大氣中的氧氣、水汽及大氣中的污染物與金屬材料表面發生相互作用，使得該材料發生腐蝕的現象。另外，在沿海區域內的大氣環境中除了相對濕度(relative humidity)較高外，更含有大量且細微的氯化鈉(NaCl)粒子。而這些微小粒子常會伴隨著水汽附著在金屬材料的表面上並分解成氯離子(Cl<sup>-</sup>)及鈉離子(Na<sup>+</sup>)，進而與材料發生相互作用，而加速材料的腐蝕。以臺灣地區為例，本島是屬於亞熱帶性海島型氣候，常年處在高溫高濕的環境，根據資料顯示，臺灣的月平均相對濕度<sup>[1]</sup>大都在 80%以上；而臺灣的沿海地區，更是高濕度及高鹽份的環境。因此，對一些需要大量冷卻水源的工廠，例如核能電廠、煉油廠、化學工廠而言，大都將廠房蓋在海邊以利於大量冷卻水的取得，因此由含 NaCl 水汽環境所導致腐蝕問題也就跟著發生。同時，廠房內部份的管件或容器，因為使用的溫度較高或本身須承受高溫的環境，間接地使金屬材料的腐蝕速率加快；例如，用過核燃料中期儲存的鋼桶，由於用過核燃料依然會緩慢地進行核分裂反應並釋放出熱量及輻射(radiation)，這使得鋼桶本身在水泥護套密封設施下，產生自然對流的散熱情形，進而累積部分餘熱在其表面，此時鋼桶本身存在的腐蝕環境將包括含有 NaCl 水汽環境及高溫(150°C~300°C)的互相作用。基於此，本研究乃選用 A516 壓力容器用鋼在實驗室的模擬含 NaCl 水汽環境下進行腐蝕測試，來探討鋼材的腐蝕行為及其反應動力學，以其找出問題的癥結。

## 二、實驗步驟

### 2.1 實驗流程

本研究針對 A516 壓力容器用鋼在模擬含 NaCl 水汽之大氣環境下，探討其腐蝕動力學及腐蝕機構，整個實驗可分為下列三大方面：

- 一. 鋼材準備
- 二. 模擬含 NaCl 水汽環境之腐蝕動力學實驗
- 三. 腐蝕後顯微結構之觀察與分析

### 2.2 鋼材準備

本研究用之鋼材是由中鋼公司提供的 ASTM-A516 壓力容器用鋼，其成份如表 1 所列。

表 1 鋼材成份表(重量百分比，wt.%)  
Table 1 Chemical compositions (wt%) of the testing steel.

鋼材種類	化 學 成 份							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
A516	0.26	0.40	1.20	0.035	0.04	-	-	Bal.

試驗試片(約 20 mm X 35 mm)是利用快速砂輪切割機先裁切成適當大小，再用放電加工機鑽一小孔以利試片在實驗時的掛取，然後將鑽完洞的試片用砂紙研磨試片至 1000 號，最後用氧化鋁粉拋光至 0.3 μm，整個測試試片控制在 1.0g 左右而厚度大約為 0.2mm。試驗前，將已完成表面研磨處理的試片置入丙酮溶液中，使用超音波震盪機反覆震盪及清洗試片約五分鐘，再用吹風機吹乾，使測試試片的表面保持潔淨光亮，再放入反應管內進行測試。鍍鹽試片(如圖 1 所示)是先將加熱盤(hot plate)加熱至 120°C 後，再把試片放置在加熱盤的面盤上，此時使用噴霧器將過飽和氯化鈉水溶液均勻噴出並形成鹽霧於加熱盤的正上方，使鹽霧均勻被覆在試片的表面上。平均而言，沉積之氯化鈉量約為 2 mg/cm<sup>2</sup>。

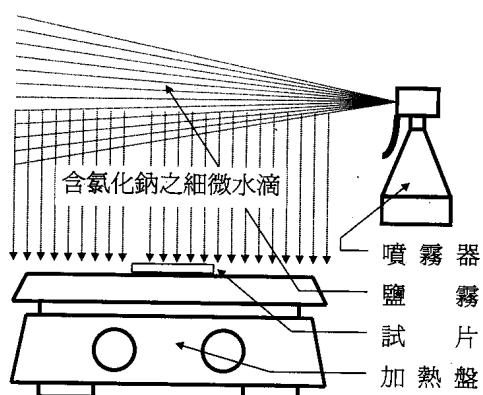


圖 1 試片噴附沈積氯化鈉的示意圖

Fig.1 Schematic diagram of the sample preparation with NaCl coating.

## 2.3 模擬含NaCl水汽環境之腐蝕實驗

### (1) 實驗設備與量測

在模擬含 NaCl 水汽之大氣環境下，所有的腐蝕實驗均在玻璃管(pyrex)中測試，以便於實驗過程中的觀察與量測。本研究的腐蝕反應源，是利用乾燥的空氣通入過飽和的氯化鈉水溶液中，並藉 88°C 恒溫，獲得相對溼度 100% 模擬含 NaCl 水汽之大氣環境。整套腐蝕實驗的裝置與設備如圖 2 所示。同時，本實驗腐蝕動力學的測量，是採用高靈敏度的石英彈簧來連續地監測因腐蝕而導致的重量變化量。實驗終了，將所得的彈簧伸長量及原始面積之相關計算，來求得單位面積重量增加量( $\Delta W/A$ )與時間( $t$ )的關係圖，進而判定整個腐蝕的動力學行爲及腐蝕反應常數。

### (2) 實驗條件

根據資料<sup>[2]</sup>得知，隨著在環境溫度的不同或通風氣孔阻塞情況的不同，一般用過核燃料中期儲存鋼桶的外壁溫度分佈在 74.4°C 至 162.8°C。但在鋼桶內部之鋼架受熱可達 370.6°C。為配合模擬此鋼桶實際的溫度與環境，實驗參數中設定溫度為 200°C、300°C 及 400°C 三個溫度。同時，為保持氣體流量的穩定，將高壓鋼瓶中的

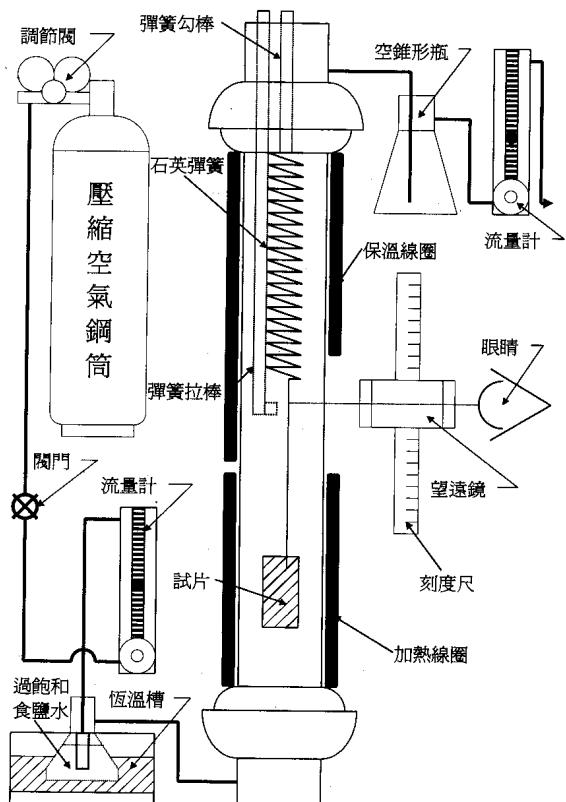


圖 2 模擬海洋環境下含 NaCl 水汽腐蝕實驗裝置之示意圖

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

乾燥空氣透過調節閥從鋼瓶中送出，並經過針閥(needle valve)與流量計(flow meter)的控制，設定流量為 200 c.c./min；然後將上述氣體導入盛有過飽和氯化鈉水溶液的錐形瓶中，該錐形瓶亦置於 88°C 的恒溫槽中。如此我們可以獲得一個近似於高濕度與高溫之含 NaCl 水汽環境的腐蝕反應氣氛，再將此一氣氛導入反應管中並與試片發生反應。

## 2.4 顯微組織之觀察與分析

所有腐蝕後的試片均利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM, Hitachi S4100)來觀察腐蝕物的表面形態。而腐蝕物的橫截面亦經由掃瞄式電子顯微鏡來觀察，並配合能譜分析儀(EDX)及 X 光元素分佈圖(X-ray maps)來做定點定量的分析。同時，亦利用 X 光繞射分析儀(XRD, Siemens D-5000)來分析腐蝕物的組成相。

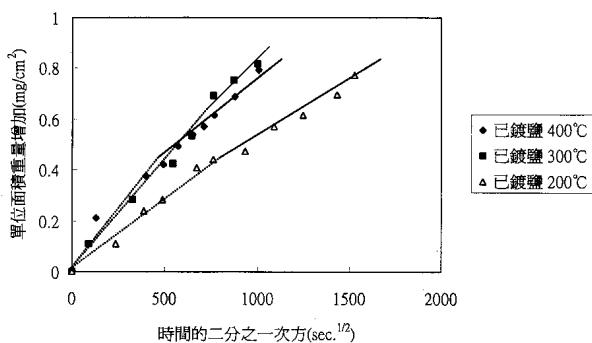


圖3 鍍鹽鋼材在不同溫度下之重量增加變化量與時間的關係圖

Fig.3 Oxidation kinetics of A516 with NaCl-coating at 200 ~ 400°C.

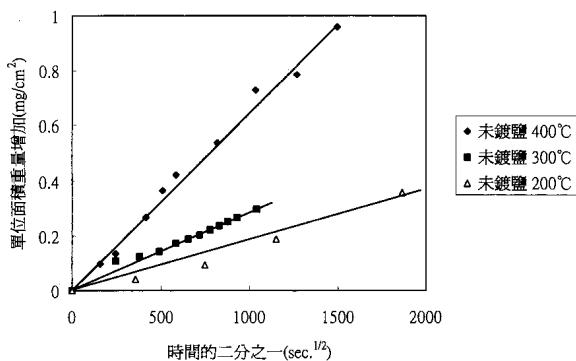


圖4 未鍍鹽鋼材在不同溫度下之重量增加變化量與時間的關係圖

Fig.4 Oxidation kinetics of A516 without NaCl-coating at 200 ~ 400°C.

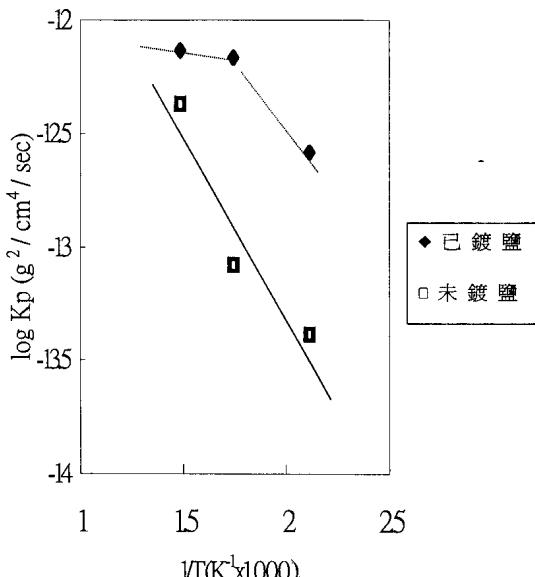


圖5 A516 的反應動力學曲線與溫度之 Arrhenius 圖  
Fig.5 Temperature dependence of the reaction kinetics of A516 steel.

表2 未鍍鹽之A516在含NaCl水汽環境下200至400 °C之腐蝕速率常數值

Table 2 Corrosion rate constants of the testing steel without NaCl-coating.

腐蝕實驗溫度	動力學行爲	腐蝕速率
200°C	拋物線型定律	$4.08 \times 10^{-14} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$
300°C	拋物線型定律	$8.35 \times 10^{-14} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$
400°C	拋物線型定律	$4.29 \times 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$

表3 鍍鹽之A516在含NaCl水汽環境下200至400°C之腐蝕速率常數值

Table 3 Corrosion rate constants of testing steel with NaCl-coating.

腐蝕實驗溫度	動力學行爲	腐蝕速率
200°C	拋物線型定律	$2.60 \times 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$
300°C	拋物線型定律	$6.87 \times 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$
400°C	拋物線型定律	$7.3 \times 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{sec}$

### 三、結果

#### 3.1 腐蝕動力學實驗

動力學結果皆以拋物線式之增重作圖法(即 weight gain vs. time<sup>1/2</sup>)繪於圖 3 及圖 4，顯示所有鋼材的腐蝕均遵守拋物線型定律。而其腐蝕反應常數，亦計算列於表 2 及表 3。表中所見，A516 的腐蝕速率隨著溫度的增加而增加，惟鍍鹽後的試片，其腐蝕速率在 300°C 與 400°C 的差異並不明顯。不過整體而言，A516 在鍍鹽後的腐蝕速率均較未鍍鹽時快，以 200°C 而言鍍鹽者為未鍍鹽者之 6.4 倍，300°C 而言約 8.22 倍，而 400°C 則約 1.7 倍。而溫度對 A516 在模擬含 NaCl 水汽環境下的腐蝕效應可由圖 5 的 Arrhenius 圖得知，其中，未鍍鹽的活化能為 92.57 Kcal / mole，鍍鹽的 Arrhenius 圖則顯示於 300 °C 上下有不同的反應機構。

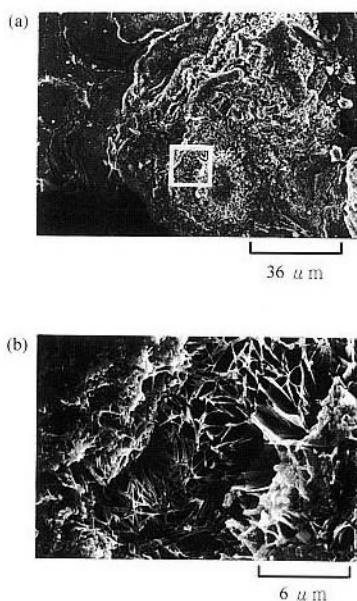


圖 6 (a)(b)未鍍鹽之 A516 試片在 200 °C 腐蝕 3050 小時後的表面形態

Fig.6 (a)Topographs of A516 steel corroded at 200 °C for 3050 hr.(sample without NaCl-coating) (b)higher magnification of (a).

### 3.2 腐蝕物之觀察與分析

圖 6(a)是未鍍鹽之試片在 200°C 腐蝕經 3050 小時後的腐蝕情形；如圖 6(b)可見，表面大部份區域已形成一層腐蝕層且外表呈現出針狀，經 EDX 分析，該區域主要含有 Fe、O、Cl 及 Na，顯示 NaCl 的附著使得鋼材產生較劇烈的局部腐蝕。圖 7(a)為 300°C 腐蝕 302 小時後的顯微結構圖，腐蝕層呈現薄片狀且有裂縫(圖 7(b)所示)，經 EDX 分析，圖中片狀區域主要是含有 Fe 及 O，顯示該層主要是由氧化物所構成。圖 8(a)為未鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下，於 400 °C 腐蝕 265 小時後，在表面亦生成如圖 8(b)之針狀的結構，其 EDX 的結果，主要還是 Fe 及 O，即此針狀物為氧化鐵。

而圖 9 至圖 11 為鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl

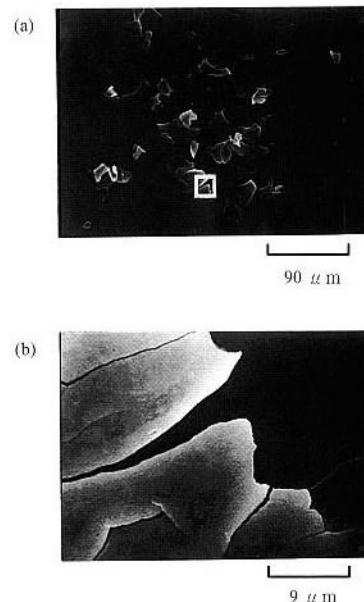


圖 7 (a)(b)未鍍鹽之 A516 試片在 300 °C 腐蝕 302 小時後的表面形態

Fig.7 (a)Topographs of A516 steel corroded at 300 °C for 302 hr. (sample without NaCl-coating) (b)higher magnification of (a).

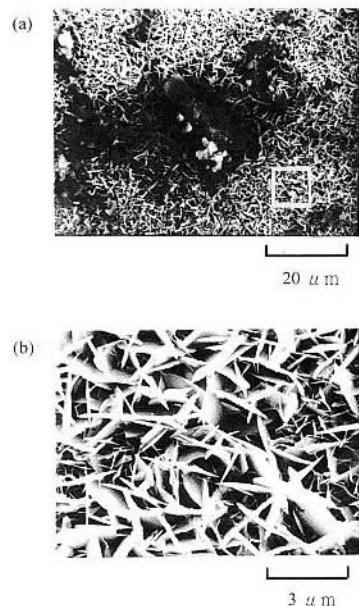


圖 8 (a)(b)未鍍鹽之 A516 試片在 400 °C 腐蝕 265 小時後的表面形態

Fig.8 (a)Topographs of A516 steel corroded at 400 °C for 265 hr.(sample without NaCl-coating) (b)higher magnification of (a).

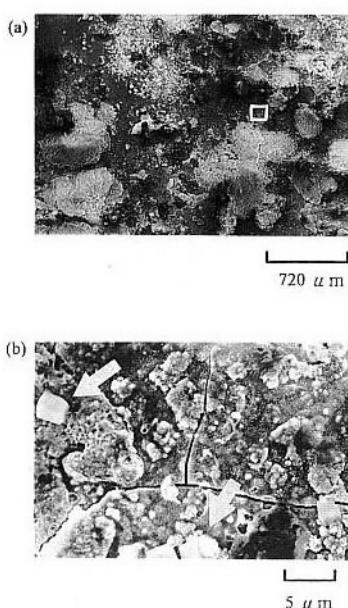


圖 9 (a)(b)鍍鹽之 A516 試片在 200 °C 腐蝕 650 小時後的表面形態

Fig.9 (a)Topographs of A516 steel corroded at 200 °C for 650 hr.(sample with NaCl-coating)  
(b)higher magnification of (a).

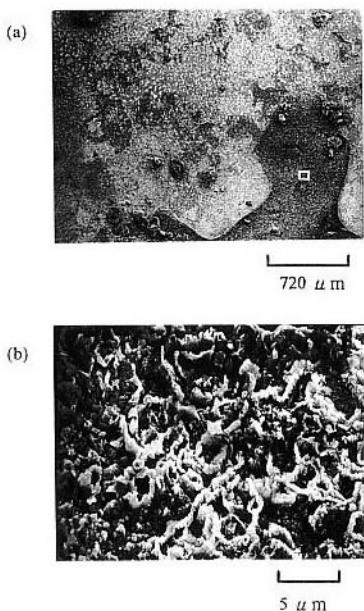


圖 10 (a)(b)鍍鹽之 A516 試片在 300 °C 腐蝕 279 小時後的表面形態

Fig.10 (a)Topographs of A516 steel corroded at 300 °C for 279 hr.(sample with NaCl-coating) (b) higher magnification of (a).

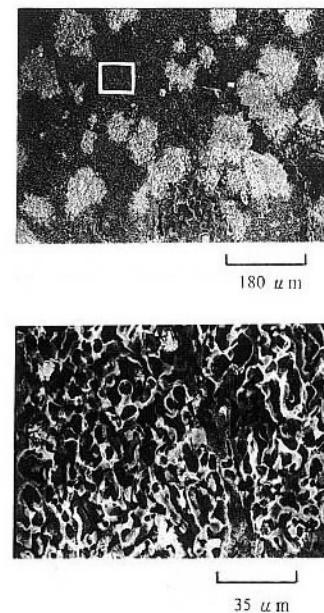


圖 11 (a)(b)鍍鹽之 A516 試片在 400 °C 腐蝕 281 小時後的表面形態

Fig.11 (a)Topographs of A516 steel corroded at 400 °C for 281 hr.(sample with NaCl-coating)  
(b)higher magnification of (a).

水汽環境下，於各不同溫度測試的表面結構圖。其中，圖 9(a)為 200°C 腐蝕 650 小時後的顯微結構圖，其表面有裂縫產生(如圖 9(b)所示)。大體而言，鋼材均與腐蝕源發生反應，腐蝕物中常夾雜著雜著有細粒狀的氯化鈉(箭頭所指)。經 EDX 分析，其主要組成為 Fe、O、Na 及少量的 Cl，顯示該區域主要是鐵的氧化物、含鈉的化合物及少量的 NaCl。而圖 10 為鍍鹽 300 °C 腐蝕 279 小時後的顯微結構圖。經 EDX 分析得知，其主要組成為 Fe、O、Na 及 Cl，亦即該區域主要是鐵的氧化物、氯化物及少量的 NaCl。圖 11 為鍍鹽 400 °C 腐蝕 281 小時後的顯微結構圖，經 EDX 分析得知圖中白色區域含有 Fe、O、Cl 及 Na，顯示該區域內除有鐵的氧化物及氯化物生成外，另有多量的氯化鈉附著。

圖 12 為未鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下，200 °C ~ 400 °C 三種溫度時腐蝕層的橫截面。由圖中可看出 A516 在 200 °C、300 °C 及

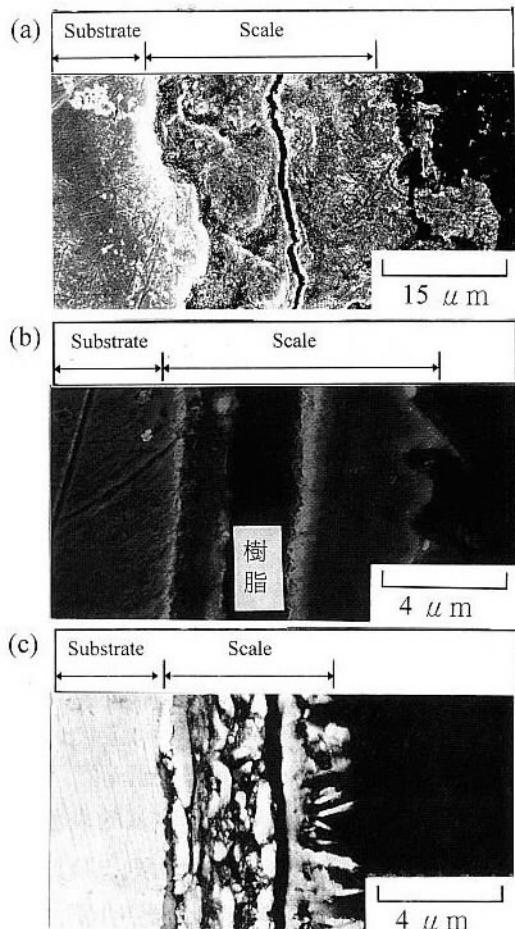


圖 12 未鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下 200 ~ 400 °C 三種溫度時腐蝕層的橫截面圖，(a)200 °C，3050 小時(b)300 °C，279 小時(c)400 °C，265 小時

Fig.12 The cross-sectional micrograph of A516 steel corroded at 200 °C ~ 400 °C, (a) 200 °C, 3050 hr, (b) 300 °C, 279 hr, (c) 400 °C, 265 hr. (sample without NaCl-coating).

400 °C 時均形成一種層狀的結構，其中 200 °C 的是緻密性高的腐蝕層，而 400 °C 較接近母材的腐蝕層則具有孔洞性。圖 13 為鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下，200 °C ~ 400 °C 三種溫度時腐蝕層的橫截面。由圖可以看出，無論是在 200 °C、300 °C 或 400 °C 均是形成單一層狀的組織結構且具有孔洞性。

另外在氯分佈的情形上，圖 14(a) 為鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下，200 °C 時

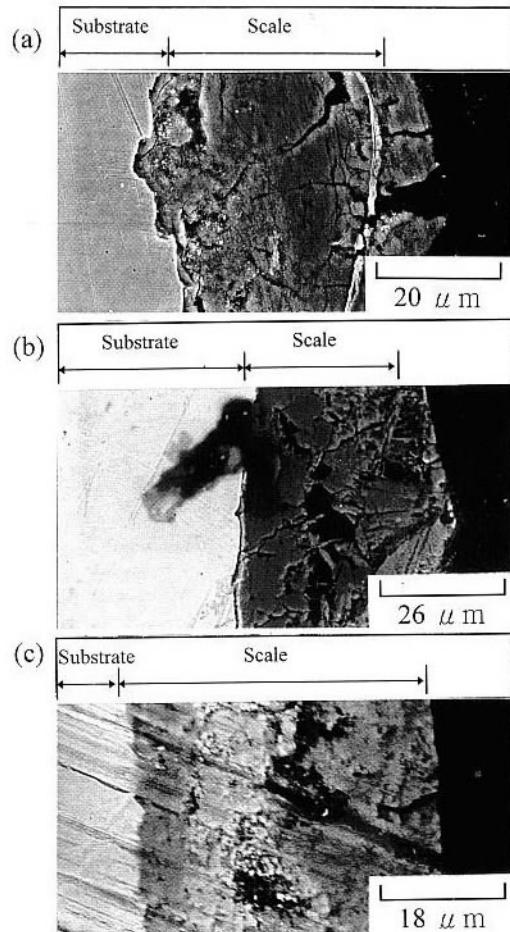


圖 13 鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下 200 ~ 400 °C 三種溫度時腐蝕層的橫截面圖，(a)200 °C，650 小時 (b)300 °C，279 小時 (c) 400 °C，281 小時

Fig.13 The cross-sectional micrograph of A516 steel corroded at 200 °C ~ 400 °C, (a)200 °C, 650 hr (b)300 °C, 279 hr (c)400 °C, 281 hr. (sample with NaCl-coating).

腐蝕層的橫截面。而圖 14(b)為 Cl 的分佈情形，可見得在腐蝕層之內側，氯離子有局部集中的現象<sup>[3]</sup>。在腐蝕產物的 X 光繞射分析上，由圖 15 可知，未鍍鹽之 A516 試片腐蝕產物主要為 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 並有含少量的 FeOOH 與氯化物(如 FeCl<sub>3</sub>-2H<sub>2</sub>O)。在鍍鹽之 A516 試片上，圖 16 可發發現除原有覆蓋在表面的氯化鈉外，其主要的產物是 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 及含少量的 FeOOH 與氯化物(如 FeCl<sub>3</sub>-6H<sub>2</sub>O 及 FeCl<sub>2</sub>-4H<sub>2</sub>O 等)。

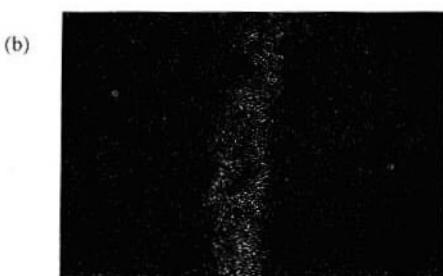
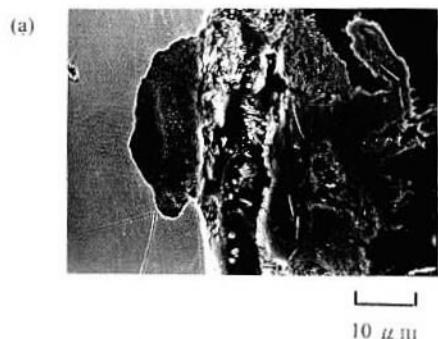


圖 14 (a) 鍍鹽之 A516 試片在 200 °C 腐蝕 650 小時後的橫截面圖(b)Cl 原素分佈

Fig.14 (a)The cross-sectional micrograph of A516 steel corroded at 200 °C for 650 hr. (sample with NaCl-coating) (b)Cl-map.

## 四、討論

### 4.1 鋼材的腐蝕動力學

由前面的結果得知，鍍鹽與未鍍鹽之 A516 試片在含 NaCl 水汽環境下於 200 °C、300 °C 及 400 °C 時皆符合拋物線型定律。如文獻中所提，鹽類易於吸收水汽並與周圍環境的水汽形成平衡狀態<sup>[4]</sup>，有利於在短時間內產生足夠厚度的腐蝕層。而此腐蝕層可阻隔陰陽離子進一步的反應，使得反應速率的決定步驟很快地由陰、陽離子的擴散行為來主控，所以其腐蝕行為乃遵守拋物線型定律。而所有鍍鹽試片的腐蝕行為都較未鍍鹽者快，可能是鍍鹽試片的腐蝕產物為含水分子較多的氯化物(如  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  及  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  等)，提供了較多的水做為傳導離子，使得鍍鹽的腐蝕速率比未鍍鹽者快，也就是腐蝕現象更劇烈。因此，我們可以推論鋼材會因為鹽類附著

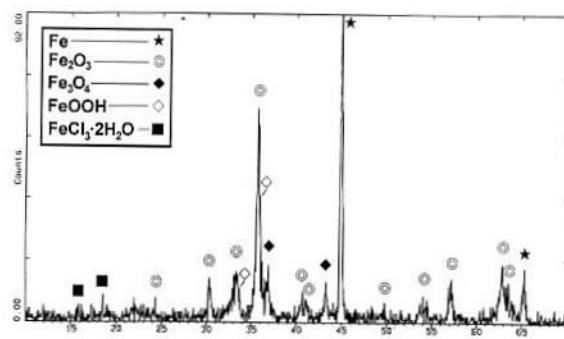


圖 15 未鍍鹽之 A516 試片在 400 °C 腐蝕 265 小時後的 X 光繞射圖

Fig.15 X-ray diffraction patterns for A516 steel corroded at 400 °C for 265 hr.(sample without NaCl-coating).

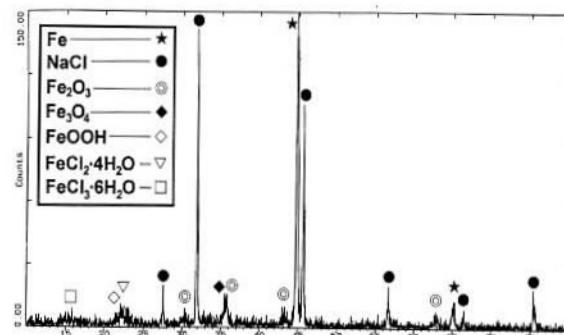


圖 16 鍍鹽之 A516 試片在 200 °C 腐蝕 650 小時後的 X 光繞射圖

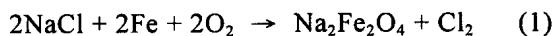
Fig.16 X-ray diffraction patterns for A516 steel corroded at 200 °C for 650 hr. (sample with NaCl-coating).

的多寡，而影響其腐蝕速率，此一結果與文獻<sup>[5]</sup>的研究結果相同。另外，一般而言，溫度愈高則腐蝕速率愈快。而本研究中，鍍鹽之 A516 試片於含 NaCl 水汽環境下，其腐蝕速率在 300 °C 及 400 °C 時卻差異並不明顯。此乃由於一般氯化物具有低熔點的特性，以  $\text{FeCl}_3$  而言，其熔點為 303 °C 及沸點為 319 °C<sup>[6,7]</sup> 皆在 300 °C 左右，液態的氯化物提供高溫腐蝕反應離子之快速傳輸路徑 (easy path)，所以鋼材除發生高溫腐蝕外，亦可能有氯化鐵熔鹽熱腐蝕的現象發生。造成 Arrhenius 圖中鍍鹽比未鍍鹽結果來的雜亂的原因。總括而言，所有 A516 試片在各溫度下，鍍鹽者的腐蝕速率比未鍍鹽者快，其主要原因可由

文獻<sup>[8]</sup>可知，首先鹽粒子主要為  $\text{NaCl}$ ，在相對溼度超過 60% 會吸收空氣中水汽使金屬表面形成一電解質濕膜，進行電化學腐蝕反應。另外氯離子有局部集中作用(如圖 14(b))，使得局部位置氯離子濃度增高，形成局部腐蝕或孔蝕。

其次，氯離子於電解質膜內移動速度極大，且直接吸附於金屬表面，由於吸附力甚強，而阻止鈍態膜的形成或破壞其完整性而加速其腐蝕。

根據過去文獻<sup>[3]</sup>的報導指出，氯化物通常有在腐蝕層/金屬的界面上聚集的現象。但氯化物具有易潮解性，使得難以直接檢測鑑定氯化物，所以在反應機構上很難去斷定，大致上氯化鈉與金屬及氧發生氯氧化(oxychloridation)反應的機構<sup>[9]</sup>為



然後以上所生成的氯氣再擴散至腐蝕層與金屬的界面處，並與金屬發生反應。



而觀察 A516 鍍鹽後的腐蝕橫截面時，也均發現氯離子在界面處聚集的現象，並有向基材侵蝕的傾向，破壞了保護層的完整性(式 1)，形成局部腐蝕或孔蝕，而使腐蝕速率加快。

## 五、結論

- 未鍍鹽及鍍鹽之 A516 試片在鹽霧環境，於 200 °C、300 °C 及 400 °C 時皆遵守拋物線型定律。
- A516 試片在含  $\text{NaCl}$  水汽環境下，其腐蝕速率是隨溫度的增加而增加。但在鍍鹽試片中，300 °C 及 400 °C 的腐蝕速率相差不大。
- 腐蝕產物主要是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  及  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，而  $\text{FeOOH}$  及  $\text{FeCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  次之。
- 在鍍鹽之試片經腐蝕後，氯離子在內層聚集，並有往基材侵蝕的現象。

## 誌謝

本研究承蒙原子能委員會放射性物料管理局經費補助(0784029k3、0785012k3 及 0786005k3)及邱賜聰局長的鼎力協助與支持，特此誌謝。同時也感謝中鋼公司提供鋼材，並感謝楊嘉靖組長、黃重嘉及謝榮淵先生之幫忙，使本研究順利完成。

## 參考文獻

- 臺灣地區各氣象站月平均相對濕度統計表，中央氣象局，(1995)。
- Sierra Nuclear Corp., Structure Analysis & Thermal Evaluation, (1994) P.3-28.
- H. J. Grabke, E. Reese, and M. Spiegel, Corrosion Science, Vol. 37 (1995) P.1023.
- T. Valand, Corrosion Science, Vol. 9 (1969) P.577.
- D.J. Spedding, Br. Corr. J., Vol. 7 (1972) P.281.
- Robert C. Weast, CRC Handbook of Chemistry and Physics, (1987) .
- George Y. Lai, High-Temperature Corrosion of Engineering alloys, (1990) P.90.
- 鄭錦榮，“重鹽害地區金屬材料大氣腐蝕資料調查與分析”，臺電工程月刊，第 527 期，(1992 年 7 月) P.30.
- Chaur-Jeng Wang, Journal of Chinese Corrosion Engineering, Vol.9, No.4, PP.225 ~ 237(1995).