

冷鏈技術中蓄冷劑對鋁蓄冷容器之腐蝕與防蝕研究 On the corrosion and corrosion inhibition of the Al-storage vessel in the coolant used in cold chain

黃彬晏¹、曾耀田²、楊建裕¹、林景崎^{*1,2}

Bin-Yan Huang¹, Yao-Tien Tseng², Chien-Yuh Yang¹, Jing-Chie Lin^{*1,2}

中文摘要

本研究之主旨在研究冷鏈技術中蓄冷劑對鋁蓄冷容器之腐蝕與防蝕。15 wt. % 氯化鈉水溶液為常用之蓄冷劑，鋁箔(厚度 7 μm)因屬於價廉且具有良好熱傳之材料，常作為蓄冷袋容器。由於氯鹽類溶液對鋁金屬腐蝕性極為強烈，一旦鋁蓄冷袋遭受腐蝕之破壞，將造成蓄冷失效及系統污染之災情與經濟損失。為防止此腐蝕現象發生，必須對蓄冷系統進行防蝕。本研究之防蝕策略採用腐蝕抑制劑防蝕法，將鋁箔試片分別浸泡在單純之-20、0、20、40 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 之 15 wt. % 氯化鈉溶液蓄冷劑中，與添加 10^{-6} M、 10^{-5} M、 10^{-3} M 濃度之 A、B、C 三種綠色腐蝕抑制劑之蓄冷劑中進行腐蝕測試，試片於浸泡 3、5、7、14 和 21 天，取出試片及除去表面腐蝕生成物後，可以求出重量損失並觀察表面孔蝕深度，再以開路電位量測、塔弗極化法量測，評估蓄冷劑對試片的腐蝕速率，陽極動態循環極化法得到腐蝕抑制劑對孔蝕之抑制效率。

關鍵詞：冷鏈、腐蝕、腐蝕抑制劑、孔蝕、陽極動態循環極化、抑制效率。

Abstract

The primary goal of this research is to investigate the corrosion and anti-corrosion of cold storage agents on aluminum cold storage containers used in cold chain technology. A typical cold storage agent is 15 wt. % sodium chloride solution, and aluminum foil (thickness in 7 μm) is often used as a cold storage bag container because it is a cheap and good heat transfer material. The chloride ion is very corrosive to aluminum metal, which makes it

收到日期：112 年 02 月 06 日

修訂日期：112 年 03 月 19 日

接受日期：112 年 05 月 26 日

¹ 國立中央大學機械工程學系

¹ Department of Mechanical Engineering, National Central University

² 國立中央大學材料科學與工程研究所

² Institute of Material Science & Engineering, National Central University

*聯絡作者：jelincom@cc.ncu.edu.tw

easy for corrosion to damage the aluminum cold storage bag. It will cause storage failures, system pollution disasters, and economic losses. We must protect the cold storage system from corrosion to prevent this corrosion phenomenon. The anti-corrosion strategy, in this case, adopts the anti-corrosion method of corrosion inhibitor. The aluminum foil samples are immersed in 15 wt. % sodium chloride solution for different temperature of 20, 0, 20, 40, and 60 °C. In addition, the 10^{-6} M, 10^{-5} M, and 10^{-3} M concentrations of three kinds of environment-friendly corrosion inhibitors (A, B, and C) were used as cold storage agents, and those samples were immersed for 3, 5, 7, 14, and 21 days for corrosion tests. The weight loss, and the pitting depth of the surface have been measured. Corrosion inhibitors for pitting corrosion were investigated. The open circuit potential and Tafel polarization method were utilized to evaluate the corrosion rate of the cold storage agent. Cyclic anodic potential polarization curves can be used to determine inhibition efficiency. Finally, electrochemical impedance spectroscopy was used to understand aluminum foil's corrosion and corrosion inhibition mechanisms.

Keywords: Cold Chain; Corrosion; Corrosion Inhibitors; Pitting Corrosion; Anode Dynamic Cyclic Polarization; Inhibition Efficiency.

1. 前言

金屬的防腐蝕保護有巨大的影響力並且在全球範圍內引起廣泛關注，原因是它的反應會造成自然資源和資金的損失，而腐蝕也每年在世界各地持續進行。鋁材最大的特點是其可塑性和耐腐蝕性，它有保護性表面氧化膜。因為憑藉這一優勢，鋁及其合金被廣泛應用於用於許多行業，例如反應容器、管道、機械和化學電池^[1]。

蓄冷板與蓄冷袋在長期熱漲冷縮的應力作用、或運輸中的相互摩擦作用下，裝置蓄冷劑的容器(多以鋁箔鍍 PVC 膜袋)，可能使用不當造成 PVC 膜損傷而有鋁箔外露，有直接和蓄冷劑浸泡接觸之可能，由於通常蓄冷劑屬於高腐蝕性的液態鹽類，裸露之鋁箔在遭受蓄冷劑的化學侵蝕下，導致鋁箔腐蝕使蓄冷袋破裂，甚至有可能因蓄冷劑外流而汙染了低溫運送商品造成損失與危險。在熱交換裝置中，常見的鋁合金腐蝕主要為孔蝕(或稱點蝕)，孔蝕屬於局部性腐蝕，尤其在氯離子環境中極易發生，孔蝕嚴重時，甚至引起鋁箔蓄冷袋容器壁之穿孔，蓄冷劑外洩而汙染運送之食品，造成嚴重之經濟損失或食安問題。有鑑於此，本次主旨在探討鋁箔與蓄冷劑之腐蝕與防蝕行為。腐蝕是材料與所處環境因發生化學或電化學作用，進而引起的性質毀壞或劣化現象。

腐蝕發生時，金屬自原子態氧化而成離子態，反應的難易程度與材料的還原電位有關。還原電位愈趨向負值，顯示其活性愈高，愈容易自原子態轉變為離子態，換言之，較易發生腐蝕。金屬鋁的標準還原電位在-1.66 V，比金屬銅(+0.34 V)要負，因此鋁及鋁合金十分活潑，極易發生腐蝕。然而鋁金屬暴露在大氣中或水中，表面立即生成氧化鋁薄膜(約 5 nm 厚)，此一氧化膜只有在 pH 介於 4.0 ~ 8.5 範圍之間呈穩定狀態，稱為鈍態膜。此鈍態膜在強酸和強鹼環境中，很容易被侵蝕性離子(如 Cl⁻、Br⁻和 I⁻離子等)，尤其是 Cl⁻局部溶解，這種局部腐蝕產生孔洞，就稱為孔蝕。

若要對蓄冷材料進行防蝕，最有效的方法就是藉由添加抑制劑之方法來控制，在蓄冷劑中添加及稀薄濃度(數十 ppm 範圍)，就能達到有效防制腐蝕^[2-6]。

在工業中已經有對鋁的防腐蝕抑制劑有許多的發展，但大多數的防腐蝕抑制劑都對於回收處理時和環境都是有害的，甚至在回收時還會產生出毒性物質。由於這些防腐蝕抑制劑對於環境與回收時所產生的問題等缺點。因此我們使用天然的化學品作為防腐蝕抑制劑在當前趨勢中處於相當重要之研究，使用綠色環保抑制劑是勢在必行。而作為腐蝕抑制劑的產品需源於以下事實：

價廉、可再生、易獲得、生態可接受且環保，更可通過簡單的提取程序獲得^[7]。

2. 實驗方法

冷鏈技術中之鋁蓄冷容器先行購置，再將蓄冷容器外部的塑膠薄膜以丙酮以及異丙醇中浸泡，之後再以超音波震盪機將被溶液所溶解的塑膠膜震盪去除，再以乙醇以及 DI Water 進行清潔，再將其烘乾，最後再將鋁箔片裁切成 1.5 cm × 6.0 cm，之後分別進行各種不同抑制劑在不同天數以及在不同溫度條件下的測試。

2.1 抑制劑在溶液中之抑制方式

抑制劑(A、B、C)通過其分子或離子在金屬表面的物理吸附或化學吸附來抑制金屬的腐蝕，從而形成保護膜。緩蝕劑的分子結構中通常含有帶有孤電子對的原子(N、P、O 或 S)或帶有離域的 π 電子的芳香環，可以使它們更容易吸附在金屬表面形成一層保護性緩蝕膜^[8]。

2.2 重量損失法

在腐蝕浸泡實驗中，由於試片和參與腐蝕元素產生反應，在試片表面生成腐蝕物附著，因而導致浸泡後之總重量比浸泡前重量增加。試片浸泡後經過 1 M NaOH 浸泡 1 分鐘完全清除腐蝕生成物之後，即可計算試片在浸泡後的重量損失，以便計算腐蝕速率。本實驗先計算浸泡後試片的損失率和每年腐蝕損失速率($\mu\text{m per year}$, μmpy)。損失率方程式如下^[9]：

$$\text{試片損失率(\%)} = \frac{(\text{浸泡前重量} - \text{浸泡後重量})}{\text{浸泡前重量}} \times 100\%$$

腐蝕速率方程式如下^[10]：

$$\text{腐蝕速率}(\mu\text{mpy}) = \text{損失重量(g)} \times \frac{\text{cm}^3}{\text{金屬密度, g}} \times \frac{1}{\text{浸泡面積, cm}^2} \times \frac{10^4 \mu\text{m}}{1 \text{ cm}} \times \frac{1}{\text{浸泡時間, h}} \times \frac{8760 \text{ h}}{1 \text{ year}}$$

浸泡所損失重量(g)，鋁密度為(2.7 g/cm³)，面積以平方公分計算，時間單位為小時(hr)。當腐蝕速率(micrometer per year, μmpy)越大，代表金屬試片在其抑制劑中的抗腐蝕能力就越低，表示腐蝕情形嚴重，其可使用之年限就越少。

抑制效率^[9, 11]：

$$\text{抑制效率(\%)} = \frac{\text{未添加抑制劑之重量損失} - \text{添加抑制劑之重量損失}}{\text{未添加抑制劑之重量損失}} \times 100\%$$

$$\text{使用年限(year)} = \frac{\text{試片厚度}(7 \mu\text{m})}{\text{抑制劑之每年損失多少微米}(\mu\text{mpy})}$$

2.3 開路電位量測及塔弗極化法量測

電化學腐蝕實驗前，通常先測定其開路電位對時間之變化，使用恆電位儀 Biologic SP-150 量測在開路電位隨變化低於 20 mV 時，紀錄其穩定之開路電位。

塔弗極化法量測為在腐蝕電位 E_{corr} 向陽極方向極化到電位 $> E_{\text{corr}} + 250 \text{ mV}$ ，或向陰極方向極化到電位 $< E_{\text{corr}} - 250 \text{ mV}$ ，所得電位對 \log 電流圖中的極化曲線，找出電流的線性範圍大於一次幕範圍，向腐蝕電位 E_{corr} 進行線性外插，即可求出 Tafel 斜率和腐蝕電流 I_{corr} 。由極化曲線外型，可判斷腐蝕特性，並計算出其抑制劑之抑制效率(Inhibition Efficiency, IE%)。

2.4 陽極動態循環極化法

陽極動態循環極化法(Cyclic Anodic Potential Polarization Curve, CAPPC)其量測之範圍由開路

電位下之-250 mV 朝+1000 mV 的範圍內，量測的目的主要是從曲線圖中得知材料孔蝕的傾向，進而計算均勻腐蝕或孔蝕的速率^[12]。循環陽極極化為陽極曲線掃至最高點後回掃至開路電位(OCP)，可用來測試試片是否有局部腐蝕傾向。當電位回掃與先前之曲線相交，可得到一遲滯迴圈(hysteresis loop)。其遲滯環的大小可以簡易判斷其抑制劑是否可以擔任這份材料的抑制劑，當遲滯圈越大時，其抑制效果就越不好，反之遲滯圈越小，則抑制劑對材料有更好的抑制作用，如圖 1 所示。

圖 1 為當我們進行量測循環陽極動態極化法時可能出現的圖形，由圖 1(A)看到當掃描電位掃過腐蝕電位(E_{corr})時，試片表面開始腐蝕，當電位掃至鈍化層初次出現電位(E_f)後，可以看見其電流密度變小，原因為試片表面有一層鈍化層之阻礙所導致的，當到孔蝕開始電位時(E or E_{pit})會分別發生不同的狀況，圖 1(A)當超過 E_b 後，可以看到電位至 1000 mV 後往-250 mV 回掃時，其電流密度並沒有變化太大甚至最後電流密度還下降，這表示了圖 1(A)並沒有發生了孔蝕

而且鈍化層增加反而導致電流密度的下降，這是預期獲得具緩蝕的情形。

圖 1(B)可以看到當電位超過 E_{pit} 掃描至 1000 mV 後往回掃時，其電流密度在相同的電位下有不同的電流密度，可以看到當電位回掃時的電流密度相較鈍化層的部分高出許多，這表示鈍化層的表面有孔蝕的出現，到最後在某個電位時會有一個相交在鈍化層生長時的電位(E_{rep})，這個電位表示了當電位在 E_{rep} 後其鈍化層會在孔蝕的部位生成，使試片不會再被溶液侵蝕。

圖 1(C)是由 1000 mV 回掃時，其電流密度並沒有下降太多，導致在 E_{corr} 後都還沒有復原，這代表了試片在這份溶液中添加的抑制劑並沒有緩蝕作用所導致的，在試片表面繼續孔蝕而沒有像圖 1(B)一樣再次生成鈍化層，直到當電位低於試片孔蝕完後的新的腐蝕電位，導致出現了第 2 個腐蝕電位，這個腐蝕電位會比原本的蝕電位低是因為試片和溶液的接觸表面積變多了，這是我們的抑制劑在高溫以及不合適的抑制劑環境所呈現的情形。

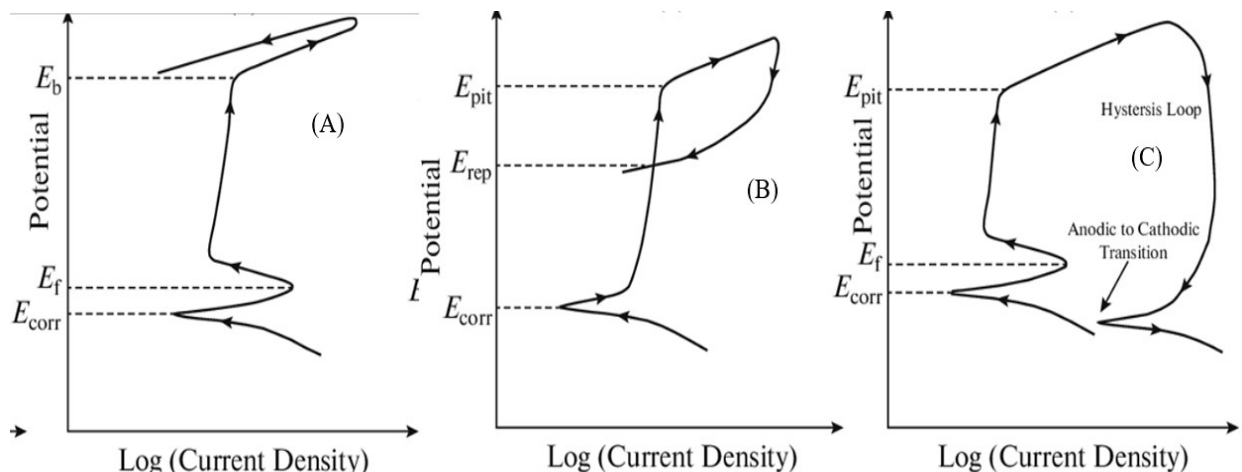


圖 1 在不同溶液環境中量測出之不同陽極動態循環極化圖。
 Figure 1 The cyclic anodic potential polarization curve of different situation in solution.

3. 結果與討論

3.1 重量損失法

表 1 表示試片浸泡在為不含抑制劑之蓄冷劑中浸泡 21 天過程中的試片重量損失率結果：3 天到 7 天損失率由 39% 增加至 53%，7 天到 14 天損失率由 53% 增加至 63%，在 14 天到 21 天損失率幾乎不變，表示浸泡 7 天內的腐蝕速率快速增加，在 14 天以後腐蝕速率幾乎達到平衡。由表 1 由腐蝕速率的公式得知沒有加入抑制劑時，平均每年損失速率為 714.19 (μmpy)，可見在蓄冷劑中如果沒有加入抑制劑的話，又蓄冷袋之 PE 膜在熱軋製程時有破洞，蓄冷劑之灌入會導致蓄冷袋快速破裂，因而造成商品的污染。由實驗得知重量損失率非常高，若在一般情況未添

加任何抑制劑的情形下使用，在 3 天內鋁箔袋會有微小之破洞，導致蓄冷劑自冰磚洩漏，導致商品污染。

表 2 為試片浸泡在含抑制劑(10^{-3} M 抑制劑 A)之蓄冷劑中浸泡 21 天過程中的試片重量損失率結果，3 天到 14 天損失率由 0.5% 下降至 0.3%。由此數據表 4 比較，得知每年損失厚度極低($1.47 \mu\text{mpy} \ll 33.43 \mu\text{mpy}$)，顯示抑制劑 A 具有相當優異的腐蝕抑制能力，可以大幅降低試片的腐蝕速率。由表 2 至表 4 的歸納結果，我們可以得出抑制劑 A 對此系統為最適合的抑制劑，而抑制劑 B 雖然未能達到抑制劑 A 的抑制程度但亦具減緩腐蝕效果，所以抑制劑 B 也是此系統之候選抑制劑之一。

表 1 無添加抑制劑固定溫度(0°C)之腐蝕速率與抑制效率隨浸泡天數之變化。

Table 1 Corrosion rate and Inhibition Efficiency at 0°C without any inhibitor for 21 days.

	浸泡前重量 (mg)	浸泡後去除氧化物重量 (mg)	試片損失量 (mg)	年損失厚度(μmpy)
3 天	188.51	147.51	61.54	1535.08
5 天	198.26	161.24	62.71	785.90
7 天	204.86	163.22	63.65	680.45
14 天	203.40	168.46	66.22	353.96
21 天	223.65	186.37	68.21	214.56

表 2 抑制劑(抑制劑 A)在 10^{-3} M 固定溫度(0°C)之腐蝕速率與抑制效率隨浸泡天數之變化。

Table 2 Corrosion rate and Inhibition Efficiency at 0°C with 10^{-3} M inhibitor A for 21 days.

	浸泡前重量 (mg)	浸泡後去除氧化物重量 (mg)	試片損失量 (mg)	年損失厚度(μmpy)	抑制效率 (%)
3 天	260.87	260.46	0.41	7.67	99.33
5 天	263.70	263.26	0.44	4.94	99.16
7 天	244.75	244.19	0.56	4.49	99.12
14 天	262.47	261.89	0.58	2.33	99.12
21 天	262.75	262.2	0.55	1.47	99.09

表 3 抑制劑(抑制劑 B)在 10^{-3} M 固定溫度(0°C)之腐蝕速率與抑制效率隨浸泡天數之變化。

Table 3 Corrosion rate and Inhibition Efficiency at 0°C with 10^{-3} M inhibitor B for 21 days.

	浸泡前重量 (mg)	浸泡後去除氧化物重量 (mg)	試片損失量 (mg)	年損失厚度(μmpy)	抑制效率 (%)
3 天	276.50	275.54	0.96	17.96	98.44
5 天	274.96	273.98	0.98	11.00	98.13
7 天	197.76	196.56	1.20	12.83	98.11
14 天	195.63	194.35	1.28	6.84	98.07
21 天	200.24	194.43	1.25	4.45	97.92

表 4 抑制劑(抑制劑 C)在 10^{-3} M 濃度下固定溫度(0 °C)之腐蝕速率與抑制效率隨浸泡天數之變化。
Table 4 Corrosion rate and Inhibition Efficiency at 0 °C with 10^{-3} M inhibitor C for 21 days.

	浸泡前重量 (mg)	浸泡後去除氧化物重量 (mg)	試片損失量 (mg)	年損失厚度(μ mpy)	抑制效率 (%)
3 天	264.62	260.84	3.78	70.72	93.86
5 天	256.17	246.45	3.72	41.76	92.92
7 天	249.12	245.59	5.02	40.25	92.11
14 天	246.42	240.52	5.90	23.65	91.09
21 天	246.37	233.86	12.51	33.43	79.22

3.2 開路電位量測及塔弗極化法量測

圖 2 各種抑制劑在不同溫度下之開路電位對浸泡時間作圖(圖示說明：0 °C 為 0C, 3 天為 3D, 依此類推)。當開路電位越高時，我們所需使試片開始發生腐蝕的起始電位就越高，我們由可以看到當溫度降低時所需要的開路電位越正，可證明需要使試片開始腐蝕的能量就要更大。

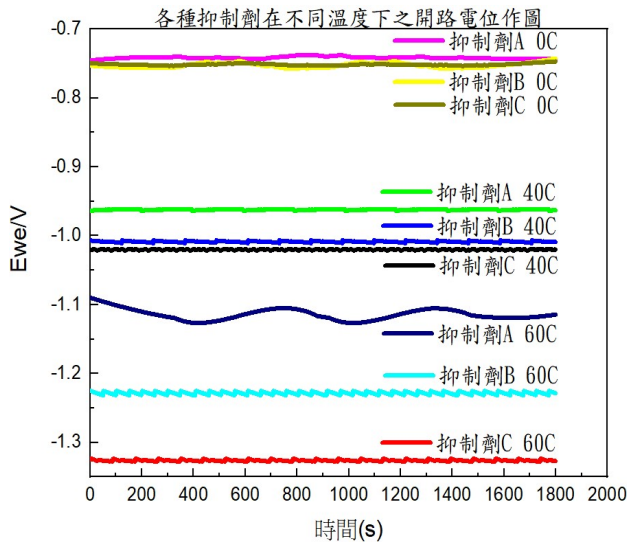


圖 2 各種抑制劑在不同溫度下之開路電位。
Figure 2 Open Circuit Potential for various inhibitors in different temperature.

圖 3 為各種抑制劑在不同溫度下之塔弗極化圖形，我們可以由塔弗極化圖可以更清楚看出如圖 2 之開路電位所述，當溫度越低時所需要的開路電位就越正，並可由圖 3 獲得大部分的的孔蝕電位(E_{pit})位於-0.80 V 至-0.75 V 之間。

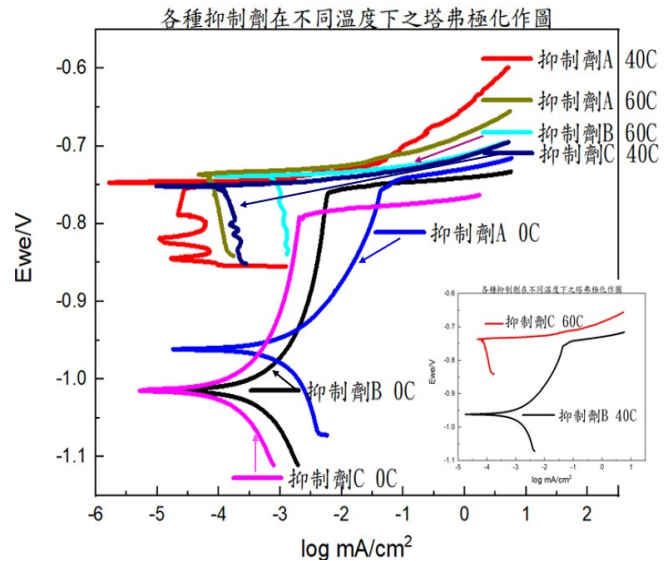


圖 3 各種抑制劑在不同溫度下之塔弗極化作圖。

Figure 3 Tafel polarization plot for various inhibitor in different temperatures.

3.3 陽極動態循環極化法

我們可以由圖 4 到圖 10 看到抑制劑 A 在所有溫度下(由 60 °C 至 0 °C)都有表現出非常好的防腐蝕及防止孔蝕的性質，而抑制劑 B 適合用在低溫 0 °C 以下之溫度；並且在低溫中，抑制劑 B 在蓄冷劑中因為溫度降低使降解速率減緩，延長抑制劑 B 使用壽命，亦使得抑制劑 B 可以作為在 0 °C 之抑制劑。最後抑制劑 C 適合在 25 °C 以上溫度使用，可能有不錯的效果，因為抑制劑 C 和抑制劑 A 一樣在高溫中還表現出遲滯迴圈的抑制劑。

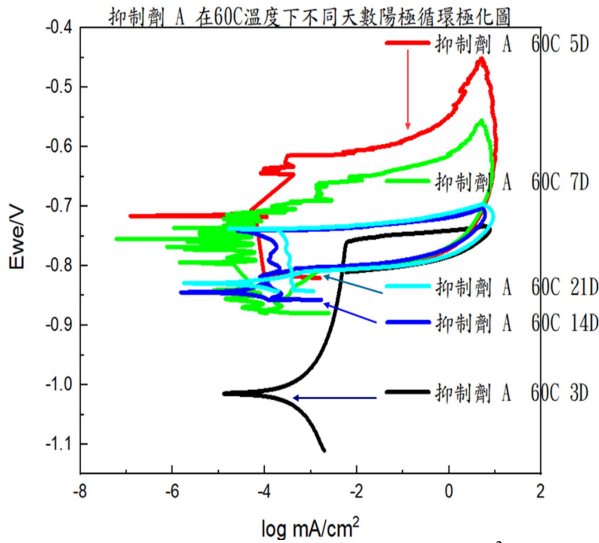


圖 4 在 60 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 A 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 4 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor A soaked for different days at 60 °C.

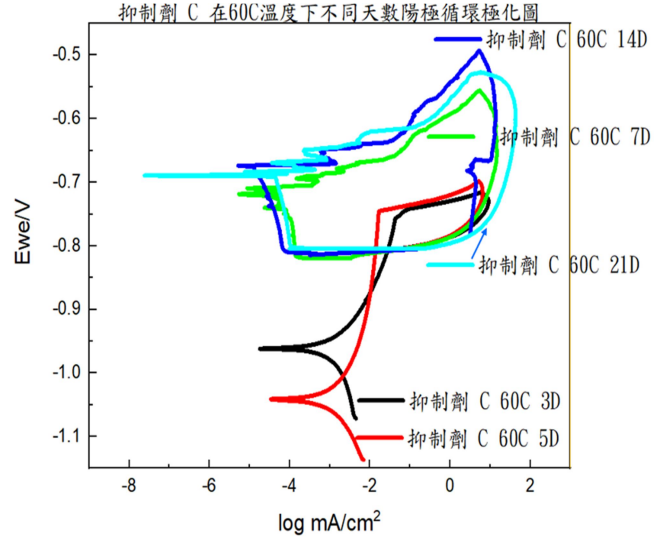


圖 6 在 60 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 C 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 6 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor C soaked for different days at 60 °C.

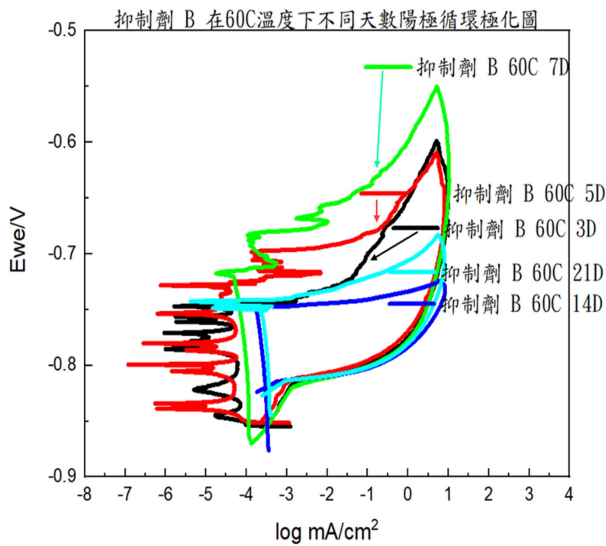


圖 5 在 60 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 B 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 5 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor B soaked for different days at 60 °C.

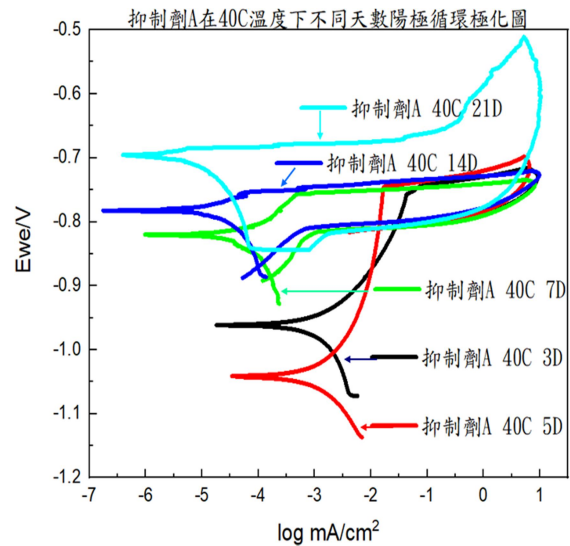


圖 7 在 40 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 A 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 7 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor A soaked for different days at 40 °C.

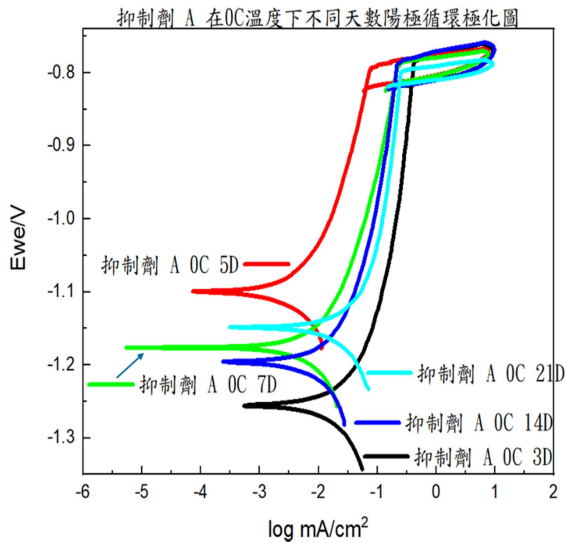


圖 8 在 0 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 A 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 8 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor A soaked for different days at 0 °C.

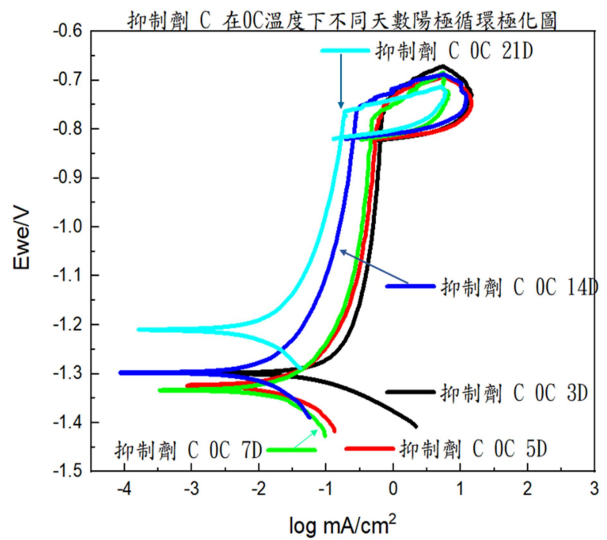


圖 10 在 0 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 C 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 10 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor C soaked for different days at 0 °C.

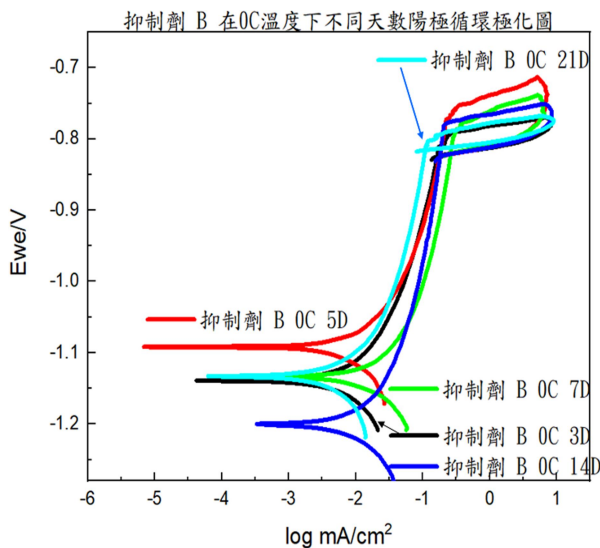


圖 9 在 0 °C 中溶液添加相同濃度(10^{-3} M)之同抑制劑 B 浸泡不同天數之陽極循環極化圖。

Figure 9 The anodic cyclic polarization diagram of the solution with the same concentration (10^{-3} M) of the same inhibitor B soaked for different days at 0 °C.

4. 結論

1. 本研究成功從冷鏈運輸業所使用的蓄冷劑中，找尋到 3 種不同溫度情況下適用的綠色腐蝕抑制劑。
2. 而由表 1 至表 4 以 0 °C 溫度下的溫度腐蝕速率，推算而得抑制劑 A 可使用 4 年，抑制劑 B 則是 3 年又 10 個月，而抑制劑 C 能使用 2 年又 7 個月，而無添加抑制劑時只能使用 0.4 年，大約為 5 個月左右。
3. 由圖 4 至圖 6 可以看出在 60 °C 的情形下，添加的抑制劑有抗腐蝕能力的排序為：A > C > B，其中抑制劑 A 和 C 在 5 天裡都仍具有遲滯迴圈現象，可視為高溫情形下的抑制劑。
4. 蓄冷劑中添加 A、B、C，在濃度 10^{-3} M 可以增進對鋁箔的抗腐蝕能力添加劑，由圖 8 至圖 10 大而小依序為：A > B > C，其中 A、B 兩種添加劑對於鋁箔孔蝕有修復能力。

致謝

感謝國科會計畫 NSTC 110-2622-E-008-

023、NSTC 110-2221-E-008-027、NSTC111-2221-E-008-086 及 NSTC 112-2221-E-008-016 提供研究經費資助。

參考文獻

- [1] “Leaves extract of Ananas sativum as green corrosion inhibitor for aluminium in hydrochloric acid solutions”, E. Ating, S. Umoren, I. Udousoro, E. Ebenso, and A. Udoh, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3 (2010) pp. 61-68.
- [2] “Synergism between cerium nitrate and sodium dodecylbenzenesulfonate on corrosion of AA5052 aluminium alloy in 3 wt.% NaCl solution”, J. Liu, D. Wang, L. Gao, and D. Zhang, *Applied Surface Science*, 389 (2016) pp. 369-377.
- [3] “Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review”, K. Khanari and M. Finšgar, *Arabian Journal of Chemistry*, 12 (2019) pp. 4646-4663.
- [4] “Inhibition of tryptophan on AA 2024 in chloride-containing solutions”, X. Li, B. Xiang, X. I. Zuo, Q. Wang, and Z. d. Wei, *Journal of materials engineering and performance*, 20 (2011) pp. 265-270.
- [5] “Evolution of the corrosion process of AA 2024-T3 in an alkaline NaCl solution with sodium dodecylbenzenesulfonate and lanthanum chloride inhibitors”, B. Zhou, Y. Wang, and Y. Zuo, *Applied Surface Science*, 357 (2015) pp. 735-744.
- [6] “A critical review on the recent studies on plant biomaterials as corrosion inhibitors for industrial metals”, S. A. Umoren, M. M. Solomon, I. B. Obot, and R. K. Suleiman, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76 (2019) pp. 91-115.
- [7] “Watermelon waste products as green corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution”, N. Odewunmi, S. Umoren, and Z. Gasem, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3 (2015) pp. 286-296.
- [8] “The roles of mercapto, benzene, and methyl groups in the corrosion inhibition of imidazoles on copper: II. Inhibitor-copper bonding”, N. Kovačević, I. Milošev, and A. Kokalj, *Corrosion Science*, 98 (2015) pp. 457-470.
- [9] “Corrosion inhibition and adsorption behaviour for mild steel by Ficus glumosa gum in H₂SO₄ solution”, P. O. Ameh, L. Magaji, and T. Salihu, *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 6 (2012) pp. 100-106.
- [10] 陳建甫, “香草醛在含 50 V% 乙二醇低氯離子溶液中對 AA6060 鋁合金之腐蝕抑制研究”, 國立中央大學材料科學與工程研究所碩士論文, 2012。
- [11] “Inhibition effects of ethyl-2-amino-4-methyl-1, 3-thiazole-5-carboxylate on the corrosion of AA6061 alloy in hydrochloric acid media”, K. Raviprabha and R. S. Bhat, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19 (2019) pp. 1464-1474.
- [12] “Anodic polarization behaviour of nickel-based alloys in neutral and very acidic solutions”, A. Mohamed, J. Cahoon, and W. Caley, *Corrosion Science and Engineering*, 15 (2012) p. 1.