

交流阻抗法評估增塗三聚磷酸鋁漆之抗蝕性

陳建仲* 薛文景*

Evaluation of the Corrosion Resistance of Aluminum Tripolyphosphate Coated on Steels by Impedance Measurements

Jame J.Chen* Wen C.Say*

摘 要

本文以電化學阻抗法量測於抗指紋鋼(中碳鋼表面鍍有薄鉻)表面塗以面漆與增塗三聚磷酸鋁漆後於3.5 % NaCl水溶液中的抗蝕性，由浸滯時間而取得連續數據的變化，得到反應中的電阻值與電容值改變，隨著浸滯時間的增長則電容值上升電阻值下降，而利用此兩種(電阻值與電容值)特性更能說明增塗三聚磷酸鋁漆後的抗蝕性。

關鍵詞:電化學阻抗法，電阻值，電容值，三聚磷酸鋁，塗裝層

ABSTRACT

The electrochemical impedance measurements were carried out in a 3.5 % NaCl solution for Cr-coated plain carbon steels. Steels with two types of surface paintings containing polyesters and with or without an extra layer of aluminum tripolyphosphate were studied in this work. The variations of capacities and resistance verse immersion time were investigated. It has found that the capacity increased but the resistance decreased with increasing immersion time which indicates the degradation of coating layers. It is observed that the steel with an extra layer of aluminum tripolyphosphate has better corrosion resistance.

Key words: Impedance, Resistance, Capacity, Aluminum tripolyphosphate, Epoxy polyester

一、前言

材料表面之耐蝕方法常以電鍍、濺鍍、蒸鍍、電著、表面塗裝等方法處理。其中對材料表面塗裝，因其步驟較電鍍等方法簡便又可得到不錯的表面防蝕效果，所以廣被一般使用於表面防

蝕，表面塗裝漆屬於高分子非導電性材料，而基材是屬於導體的金屬材料，因此其界面間產生了明顯的電容效應，此種效應有利於以交流阻抗法分析，交流阻抗法則為近年來研究材料接近於平衡表面之狀態下的腐蝕行為工具。因為直流測試

*國立台北科技大學材料及資源工程技術系

Department of Materials & Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Science and Technology

是利用外加一範圍的電壓值對應出該範圍內電流密度的變化情形，而判斷出材料的腐蝕情形，但其所測到的值為該點電壓下材料腐蝕的總反應值，不易深入的探討材料表面塗裝之抗蝕反應細節，且礙於無法對非導體所產生的微小訊號做測試，這些問題可由交流阻抗(AC Impedance Spectroscopy)技術法來克服^[1-3]。因為交流阻抗測試為非立即破壞性檢測，所以可對相同試片做連續性觀察。材料塗裝後其表面可視為基材部份、電雙層、及塗層部份，基材為提供電子移動的路徑，電雙層與塗層則為阻止離子通過的區域，所以整個系統可以電子元件(Electronic component)模擬之。電子元件中的電容較易受頻率的影響，所以可加一頻率範圍於該試片，即將待測試片置於溶液中通入一固定範圍內的頻率，則可測到隨著頻率變化溶液與試片間的阻抗反應產生了變化^[4-8]，若將頻率值置於 X 軸，總阻抗值置於 Y 軸則可得所謂的 Bode 圖，Bode 圖的特性為當頻率值大時阻抗值降低，頻率值小時阻抗值增大^[4-8]，利用 Bode 圖的分析可由其阻抗值高低初步判斷出材料的耐蝕情形，若以阻抗值之實數部分為 X 軸、虛數值部分為 Y 軸所得之圖形稱為 Nyquist 圖，利用 Nyquist 圖則可清楚的判斷塗裝層與基材於環境中的抗蝕特性。Nyquist 圖可分解成頻率值、總阻抗值、與相角值。頻率值為外加因素，總阻抗值由電阻抗值、電容抗值、電感抗值所產生，而利用相角值的判斷可清楚的將總阻抗值中的電阻、電容、電感值加以區分。應用以上所得之各種電子元件值配合測試天數為阻抗特性的變化可模擬出塗裝層的破壞步驟與較佳之塗裝方法^[9-21]。

二、實驗方法

本實驗使用由中鋼公司所提供的基材(中碳鋼表面鍍一層鋅與薄鉻；中鋼公司稱為抗指紋

鋼)，表面以環氧基樹脂面漆塗裝或塗面漆後再增塗一層三聚磷酸鋁漆。針對經此二種方式塗裝漆後的基材表面防蝕效果進行評估。測試前將待測試片表面以丙酮擦淨，再以蒸餾水沖淨、吹乾後置於人工海水(3.5%NaCl 水溶液)中一小時(使電流穩定)開始測試。試片置於 3.5%人工海水溶液中泡置，浸泡面積為 5.3cm²(配合試管的設計)，浸泡時間為數天，每隔數小時取樣一次做交流阻抗測試。實驗設備主要為，頻率響應分析儀(Frequency Response Analyzer)及所配合之 EG&G273 恒電流電位儀(Model 273A Potentiostat / Galvanostat)。實驗裝置如圖 1 所示，以試片為工作電極，AgCl 電極為參考電極，鉑片和鉑絲為輔助電極，由恒電流電位儀送出 5mV 的微小電壓提供交流訊號產生所需的振幅。頻率響應分析儀提供一頻率範圍(10^+5 至 10^{-3} Hz)測試

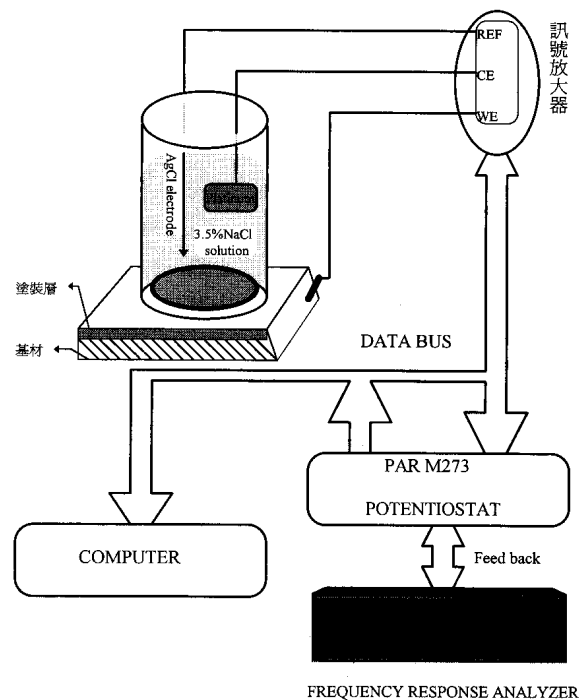


圖 1 實驗裝置

Fig.1 Schematic apparatus.

待測試片受頻率影響而產生的各種數據變化，由參考電極路徑可測到試片於腐蝕進行中的電壓變化情形，由白金電極路徑可測出電流變化情形，而所測得的數據經由軟體轉換成 Bode 與 Nyquist 圖。將模擬用之電阻電容等元件配合實際上之物理意義組合成等效電路，而由電路上比較與解釋塗裝後材料的耐蝕行為。

三、結果與討論

鋼材實驗前表面經鍍一層薄鉻，有較佳的抗蝕性，其效果可由圖 2(a)與(b)得知，(a)為鋼材表面鍍鉻層的破壞情形，因為鉻的表面張力大，所以破壞時為塊狀裂開的情形，較一般以層狀破壞的方式具有更加之抗蝕性，(b)為浸泡數天後去除表面塗裝層，基材的腐蝕情形，破壞情形與(a)具相同的形式都是塊狀的破壞。(c)為鋼材表面僅以環氧基面漆塗裝後於電子顯微鏡 500 倍下的表面情形，(d)為增塗三聚磷酸鋁漆後的表面情形，三聚磷酸鋁漆的緻密程度較面漆佳，為抗蝕性較佳的另一可能原因。(e)為面漆的塗層厚度約為 $30\text{ }\mu\text{m}$ ，(f)為增塗三聚磷酸鋁漆後的總塗層厚度約為 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。圖 3(a)為材表面經面漆塗裝後，浸泡於人工海水中 1、40、80、120、至 160 小時後的 Bode 圖比較，可看出最初(1 小時)其 Bode 圖的值在各頻率範圍下均為最高，表示此時有較佳的耐蝕度，隨著時間的增加其 Bode 圖的曲線亦逐漸往下降，所以由 Bode 圖可方便的偵測出隨著時間的增加，面漆的抗蝕效果漸漸減弱情形，圖 3(b)為再增塗三聚磷酸鋁漆後於 1、40、80、120、及 160 小時後的 Bode 圖比較，其阻抗變化相對於僅以環氧基面漆塗裝之試片呈現較穩定的情形，且其阻抗亦較僅以面漆塗裝之阻抗值大，圖 3(c)為面漆塗裝後浸泡 180 小時與再增塗三聚磷酸鋁漆後之試片浸泡同樣時間之 Bode 圖比較，增塗後不但阻抗值明顯增

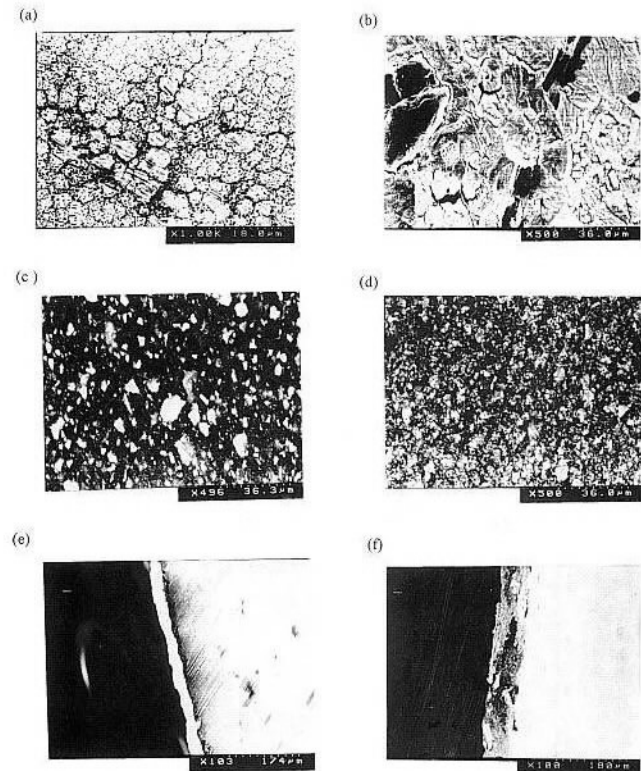
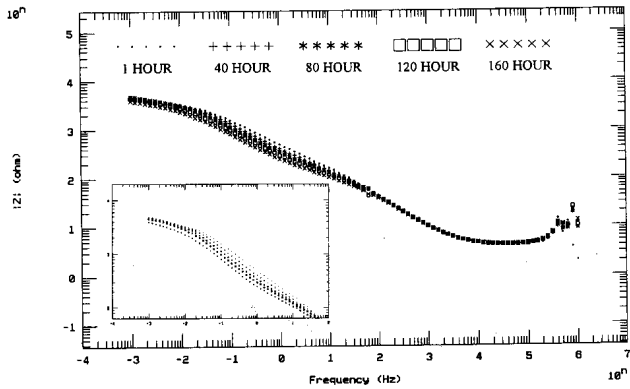


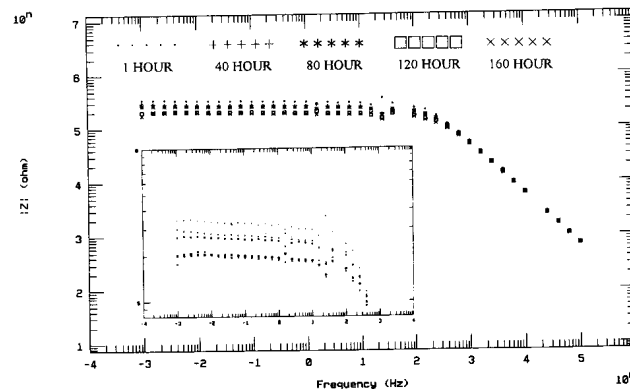
圖 2 (a)鍍鉻層的腐蝕 (b)去除塗漆後底材的腐蝕 (c)面漆表面 (d)增塗三聚磷酸鋁漆後之表面 (e)面漆塗裝之橫截面 (f)增塗三聚磷酸鋁漆後之橫截面，厚度約為 $100\text{ }\mu\text{m}$

Fig.2 Morphology of surface coating (a) corrosion performance for chromium plated steel (b) specimen corroded with a failure coating (c) surface of epoxy coating (d) with an extra aluminum tripolyphosphate layer (e) cross section morphology of epoxy coating (f) cross section of (d) the thickness of coating is about $100\text{ }\mu\text{m}$.

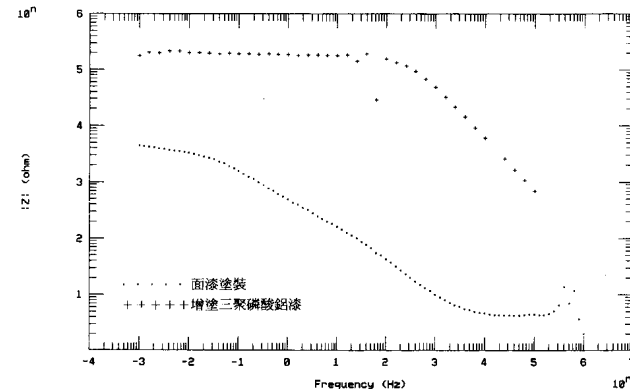
加許多，且於低頻區呈現較穩定的阻抗值，其電容的影響較少，所以塗裝後穩定性佳。圖 4 為圖三之 Nyquist 圖表現方式，產生半圓的圖形，由電路學的解釋可知其必包含一組以上的電阻與電容並聯電路，將實驗中各點數以線段連成半圓於高頻率區與低頻率區分別出現半圓為 S_1 與 S_2 ，因圖 4 中電雙層的阻抗與塗裝層的阻抗值相差甚大，所以使電雙層的半圓相對的不明顯。Nyquist 圖中的半圓可如圖 5 所示，以等效電路來表示。由於電荷轉移電阻(R_{ct})與電雙層電容



(a)



(b)



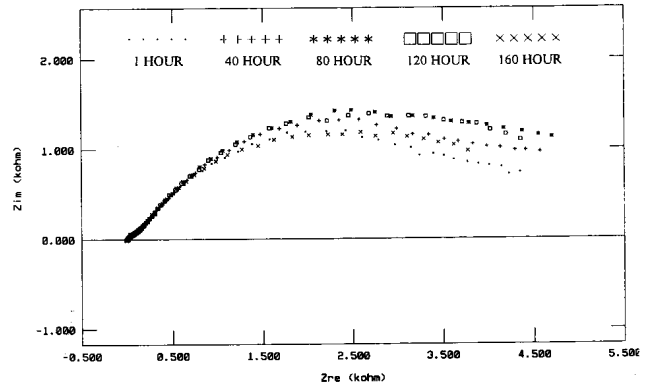
(c)

圖 3 Bode 圖的比較 (3.5%NaCl)

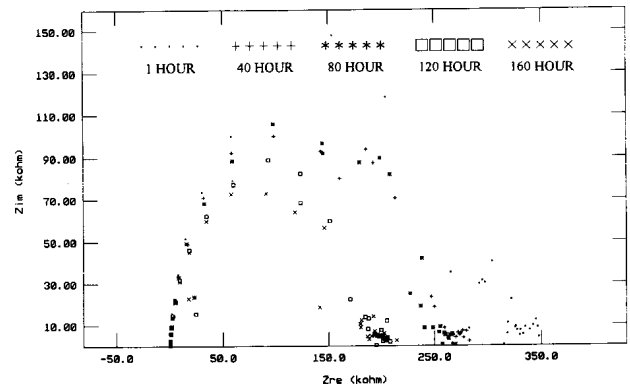
(a) 面漆的 Bode 比較 (b) 增塗三聚磷酸鋁漆後的 Bode 圖比較 (c) 浸泡 180 小時後面漆與增塗三聚磷酸鋁漆的 Bode 圖比較

Fig.3 Bode plots obtained in 3.5%NaCl solution.

(a)epoxy polyester (b)epoxy polyester and aluminum tripolyphosphate on top of it (c) Bode plot obtained after 180 hours of immersion.



(a)



(b)

圖 4 Nyquist 圖的比較

(a) 環氧基面漆塗裝後試片浸泡於 3.5% NaCl 溶液中之 Nyquist 圖

(b) 增塗三聚磷酸鋁漆塗裝後試片浸泡於 3.5% NaCl 溶液中之 Nyquist 圖

Fig.4 Nyquist plots obtained.

(a) Nyquist plot for epoxy coating after immersion

(b) with aluminum tripolyphosphate coating

(C_{dl})並聯可運算出一個半圓(S_1),第二個半圓(S_2)為塗裝電阻(R_{pf})與塗裝電容(C_{pf})並聯可產生。 S_1 為外層電路(電雙層)的半圓, S_2 為內層電路(塗裝層)的半圓, Nyquist 圖因為電阻不受頻率的影響,其阻抗值 $Z_R = R$, 電容受頻率影響,所以其容抗值為 $Z_c = 1 / j\omega c$, 若 Z 為總阻抗值則:

$$Z = Z' + jZ'' \quad (1)$$

當以 ω 表角頻率值時

$$Z = R_{so} + \frac{R_{ct} * \frac{1}{j\omega C_{dl}}}{R_{ct} + \frac{1}{j\omega C_{dl}}} \quad (2)$$

或

$$Z = \left[R_{so} + \frac{R_{ct}}{1 + (\omega R_{ct} C_{dl})^2} \right] - j \left[\frac{\omega R_{ct}^2 C_{dl}}{1 + (\omega R_{ct} C_{dl})^2} \right] \quad (3)$$

式(3)可以整理得到一圓的方程式

$$\left(Z_{RE} - R_{so} - \frac{R_{ct}}{2} \right)^2 + Z_{IM}^2 = \left(\frac{R_{ct}}{2} \right)^2 \quad (4)$$

而以 $1/2 R_{ct}$ 為半徑，邊界值為 R_{so} 與 $R_{so} + R_{ct}$ 若套入圖五中的電路圖結構則可得：

第一個半圓半徑為 $1/2 R_{pf}$ ，邊界值為 R_{so} 與 $R_{so} + R_{pf}$ ，同理可推算出：

另一圓半徑為 $R_{pf} + 1/2 R_{ct}$ ，邊界值為 $R_{so} + R_{pf}$ 與 $R_{so} + R_{pf} + R_{ct}$ 。

此外因電容值受頻率影響，而使電容的相角為 90 度，但電阻不受頻率的影響，所以電阻的相角為 0 度，如圖 5(b)所示，於高頻時可視電容為短路現象，電流路徑為 A 路徑至 Load，外加的頻率可測到電容元件的相角為 90 度，於低頻時可視電容為斷路現象，電流路徑為 B 路徑至 Load，外加頻率可測到電阻的相角圖為 0 度。這些可以圖 6 中所得試片之的相角圖證實之。

材料經塗裝後經與人工海水間之界面可以圖 7 解釋之，因固體與液體接觸面反應的延遲，使待反應的離子堆積而形成所謂的電雙層效應 (Electrode double layer effect)，可用一電容模擬之，稱為電雙層電容， C_{dl} 。但是，此電容會產

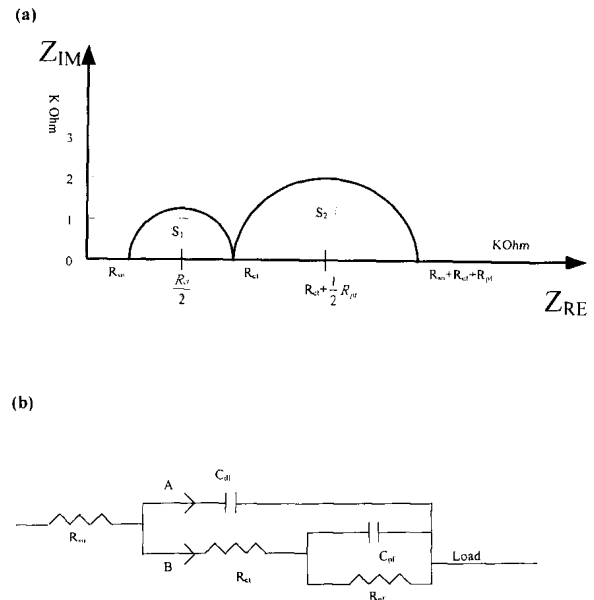


圖 5 Nyquist 圖中之半圓(a)可以等效電路(b)來表示

Fig.5 Complex Nyquist plots for an electrical equivalent circuit.

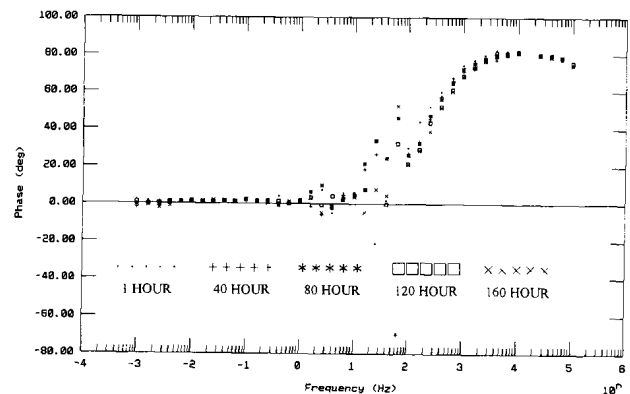


圖 6 增塗三聚磷酸鋁漆的相角圖比較

Fig.6 Frequency dependence and phase angle for the corrosion performance of aluminum tripolyphosphate coating.

生漏電現象，由電路學的觀點必需再加一電阻並聯提供放電路徑，此加入的電阻可由兩方面解釋，一為漏電電阻 (Resistance of Leaking)， R_L ，另外亦可認為固體與液體間的電荷移轉電阻 (Charge Transfer Resistance)， R_{ct} 。所以漏電電阻與電荷移轉電阻可視為同一電阻，($R_{ct} = R_L$)。

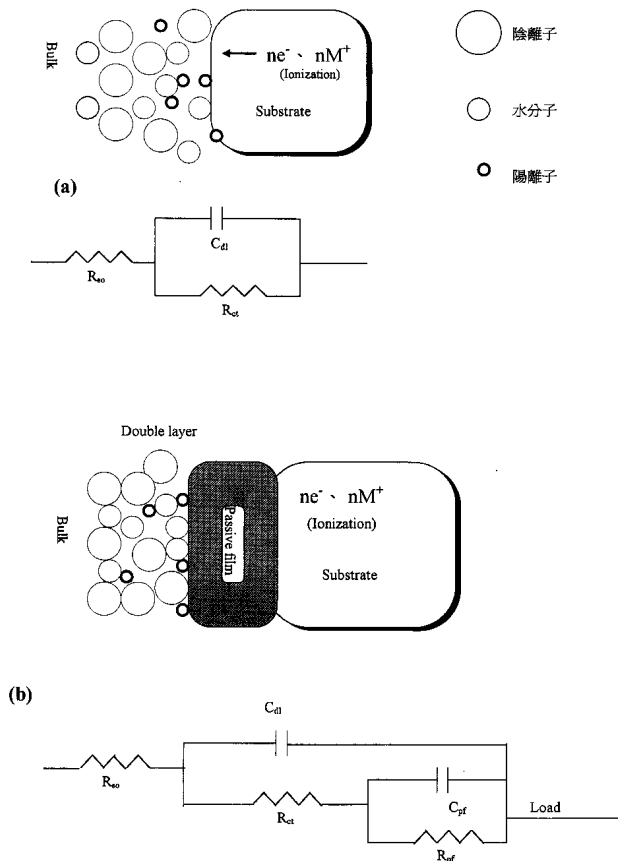


圖 7 利用電路圖表現腐蝕系統。(a) 材料與溶液間之關係和等效電路圖 (b) 材料經塗裝後與溶液間之關係和等效電路圖

Fig.7 Electrical equivalent circuit of corrosion performance in the solution (a) without coating (b) with a coating.

由電化學解釋可認為電子與離子之結合途徑時受到電雙層內之離子與水分子的阻礙，其結構與電容結構原理相仿所以可以一電容模擬之，電雙層中可能有許多離子，所以可產生電荷移轉電阻 R_{ct} ；又電雙層電容與電荷移轉電阻具有同時的放電路徑，所以呈現並聯狀態。溶液與材料間之電雙層堆有離子與水分子，電子於游離出與離子結合途徑中受到此層電雙層的阻礙而產生電阻值，電雙層的電路模擬如前所述，可用一組電阻與電容並聯代表之，溶液電阻因是由於液體所產生之電阻，所以電子路徑是經由溶液後再通過電

雙層，由電路學的考慮上可視為與電雙層等效電路串聯。另外塗裝層亦會阻止離子從材料內部進入溶液中而產生另一電阻(R_{pf})。塗裝層與材料間的厚度可視為電容的兩平行板，可以塗裝層電容模擬之(C_{pf})，溶液、電雙層、塗裝層間形成了明顯的界面效應，於電路學的考慮上應以串聯效應表現，塗裝層電阻並聯塗裝層電容此組電路可視為塗裝層的等效電路，電荷轉移電阻和電雙層電容此組電路則可視為試片與溶液間的等效電路。將這些因素組合而得圖 7 的等效電路。電路的組合順序分別為，溶液、電雙層，而塗裝層，與基材，所以溶液電阻必與電雙層此組電路串聯，又電雙層與塗裝層接觸，所以電雙層再與塗裝層串聯，圖 8 中所示為溶液產生的電阻稱為溶液電阻(R_{so})，溶液電阻的變化(R_{so})，因溶液中的離子強度相對的穩定，所以溶液電阻為一平穩的低電阻值。圖中顯示環氧基面漆的溶液電阻值大於增塗三聚磷酸鋁漆後的溶液電阻值，因所塗裝之漆為環氧基漆，其水溶性較大，將使溶液的導電性變差，相對的溶液電阻變大，由圖中的曲線比較可知面漆溶於溶液中的量多於三聚磷酸鋁漆，所以面漆的溶液電阻較大。若為將面漆塗裝後與增塗三聚磷酸鋁漆的電荷轉移電阻(R_{ct})變化情形比較則可如圖 9，三聚磷酸鋁漆的電荷轉移電阻於前 20 小時前的斜率下降較快，20 至 40 小時區域電阻值則是上升，往後電阻值則呈現較平穩緩慢下降的情形，面漆的電荷轉移電阻曲線隨著時間的變化則是振盪的情形，三聚磷酸鋁漆受溶液侵蝕後本身產生鈍化現象(20 至 40 小時)，使溶液中欲進入塗層的離子停留於塗層外的電雙層內，阻礙電荷的傳遞，所以電阻值於 20 至 40 小時區域上升，40 小時後則反應速率漸漸增加，此時因塗裝層漸受破壞，而使電雙層內的離子漸漸滲透入塗裝層內，所以電雙層內堆積離子的量減少，使得電荷轉移電阻值下降。面漆因

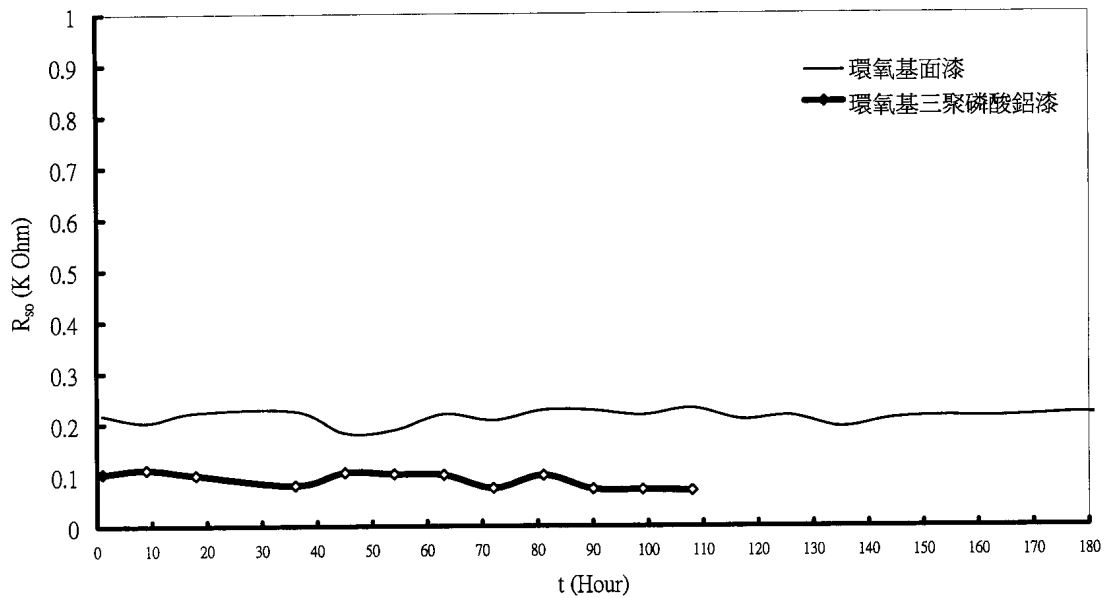


圖 8 試片經兩種塗裝後其所浸泡之溶液電阻值(R_{so})變化

Fig.8 Time dependence of R_{so} , solution resistance, for the corrosion performance of specimen with and without aluminum tripolyphosphate coating.

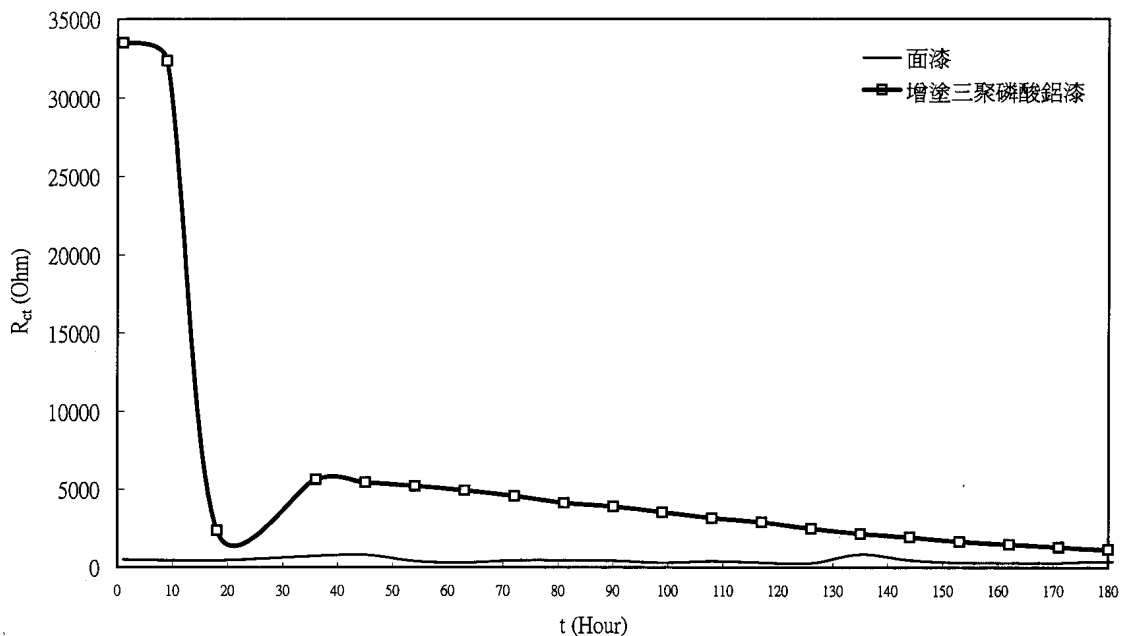


圖 9 試片經環氧基面漆塗裝與再增塗三聚磷酸鋁漆後之電荷轉移電阻(R_{ct})比較

Fig.9 Time dependence of R_{ct} , charge transfer resistance, for the corrosion performance of specimen with and without aluminum tripolyphosphate coating.

較不耐腐蝕，所以電荷進出塗裝層間容易，相對的電荷轉移電阻值亦較低。抗指紋鋼表面經塗裝後於測試期間所得的數據，塗裝層電阻可視為塗層阻止離子通過的程度，所以由塗層電阻的變化

最能代表塗裝層於測試期間的耐蝕情況，觀察塗層電阻值的變化，由圖 10 的比較看出鋼材若只以環氧基面漆塗裝是無法久耐於人工海水中浸蝕，而增塗三聚磷酸鋁漆後，其塗層電阻值(R_{pf})

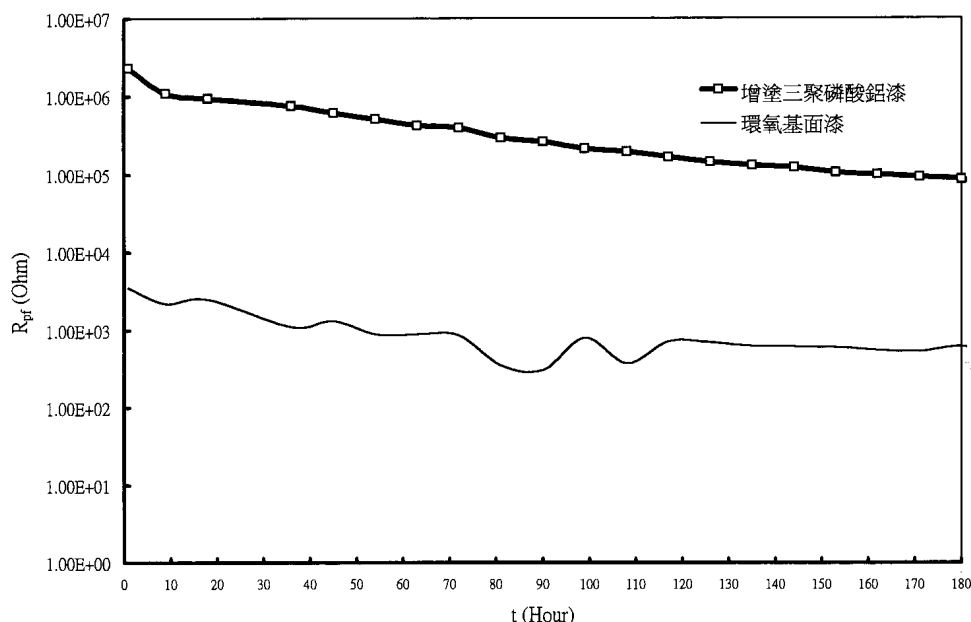


圖 10 試片經塗以面漆與增塗三聚磷酸鋁漆後的塗裝電阻值(R_{pf})變化

Fig.10 Time dependence of R_{pf} , coating resistance, for the corrosion performance of specimen with and without aluminum tripolyphosphate hate coating .

增加了 10000 倍，雖然隨著時間增加其塗層電阻值亦隨著下降，但相對於只以面漆塗裝的塗層電阻卻改善了許多，由圖中得知前 15 小時浸蝕後其電阻值急速降低，此時塗裝層進入活化狀態 (Active state)，之後的反應則趨近於平衡狀態，所以曲線下降的斜率較緩慢。面漆的塗裝層電阻值則是低且振盪的情形，此因離子不斷的進出於塗裝層內反應的現象。塗裝層未受破壞前的介面為溶液與塗裝層間的反應，其阻抗值較高，塗裝層的受破壞同時影響了電荷轉移電阻值(R_{ct})，圖 9 和圖 10 具有相同的曲線變化趨勢，圖 10 中的第 10 個小時前因為塗裝層已漸受破壞，所以通過塗裝層的離子量漸漸增加，相對的電荷轉移阻礙能力亦變弱了，所以其電阻值隨之下降，雖然圖 9 中 20 小時至 40 小時區電荷轉移電阻值(R_{ct})上升，但圖 10 中卻未發生此現象，因為之前的大量離子在電雙層區域，所以 20 至 40 小時間並不會造成塗裝層內的離子補充不足現象，此段時間內的塗裝層電阻並不會隨著電荷轉移增加而增加。由圖 9 與圖 10 呈正比關係更能說明以上

的現象。造成塗料層對基材保護性品質不佳的另一原因為塗裝層與基材間的界面接合問題，當界面接合性差時則界面間易形成過多的孔隙，將使得離子更容易進出於基材與塗裝層間，因為當電容值增加時，電容抗值下降， C_{pf} 與 C_{dl} 則可利用已知的總阻抗值與 R_{so} 、 R_{ct} 、 R_{pf} 、頻率值計算得知。當塗裝層 C_{pf} 值變大時表示其充電能力增加，相對的塗裝漆與基材間的接合性亦變差了。由圖 11 中可看出增塗三聚磷酸鋁漆後的電容值(C_{dl})小於只以面漆塗裝後的電容值，三聚磷酸鋁漆的電容值呈現低的平穩值，而面漆的塗裝層電容則持續的上升，於前述中得知 $Z_c = 1/j\omega c$ ，所以電容值越高則其容抗值越低，因面漆較不耐蝕的現象，而造成電荷大量且持續的通過於塗裝層與基材間，所以離子堆滿於塗層兩端，當塗層因遭電解質滲入而起分解時成為半導體狀態，造成電容值的持續增加情況。三聚磷酸鋁漆則因其耐蝕性佳，所以相對於面漆其反應為維持在溶液與塗裝層間，僅有少數的正負離子會在兩平行板間互相感應，則塗裝層若無受破壞使離子滲入塗

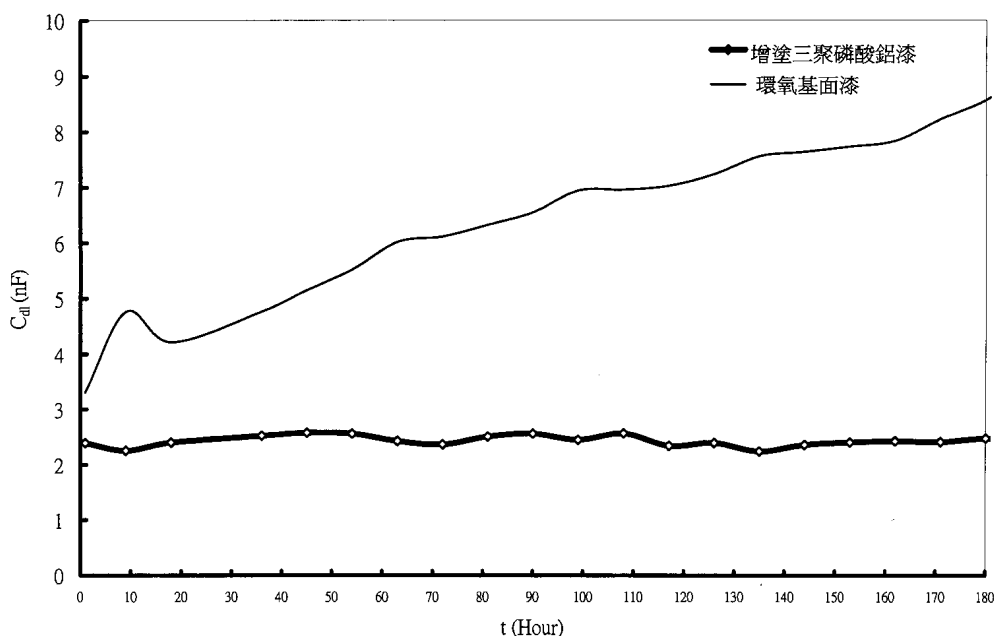


圖 11 試片經環氧基面漆塗裝與增塗三聚磷酸鋁漆後之電雙層電容值(C_{dl})隨時間變化圖

Fig.11 Time dependence of C_{dl} , double layer capacity, for the corrosion performance of specimen with and without aluminum tripolyphosphate coating.

層，其電容值不會有太大的變化，此時為非導體狀態。由於塗裝層電容的變化可判斷離子滲入塗層的程度多(半導體)或少(非導體)，所以由其變化可判斷塗裝層的特性。

電雙層為液體與固體接觸時的一層薄介面，而塗裝層則為人工所施加的一層較厚介面，所以塗裝層不論是阻礙離子的能力(電阻效應)，或是儲存電荷的能力(電容效應)，都大於電雙層，如圖 9 和圖 10 的比較或圖 11 和圖 12 的比較因電雙層的離子補充來源直接得自於水溶液中，而塗層則因阻礙離子通過與基材反應，將離子阻擋於電雙層內。所以由 C_{dl} 的變化可瞭解離子的補充程度，進而判斷塗層的品質。由於電荷密度(Q)與電容的關係為 $Q = C/\epsilon d$ ， C :電容值， d :電容平行板距離， ϵ :電場強度，所以當電容量增加時，表示電荷密度增加。如塗料的質變程度越快，則大量的離子由電雙層區進入塗層區，所以 C_{pf} 值增加速率越快。圖 11 中環氧基面漆的 C_{dl} 值隨著時間的增加其電容值亦上升，表示大量的離子被補充進入電雙層區進而與塗裝

層反應，圖 12 中環氧基面漆的 C_{pf} 值則是與圖 11 中具有相同的趨勢，結合以上兩現象可知面漆受破壞後大量的離子通過塗層與基材反應，所以 C_{pf} 吸附大量的電荷，而電雙層區則因滲入過多的離子而使 C_{dl} 持續上升。當塗料具保護性時， C_{pf} 值呈現較低狀態，如圖 12 中增塗三聚磷酸鋁漆後的 C_{pf} 值。

綜合以上所論，可以圖 13 說明之，三聚磷酸鋁漆對於離子較具有阻礙力，只允許少量的離子進入塗層內如(圖 a)，所以此層為阻礙性塗層，於電容的觀點而言此區域吸附少量的電荷密度，所以電容量較低，於電阻的觀點而言，此區域具有阻礙性，所以電阻值增加，因塗層內的離子擴散慢，所以塗層外的電雙層區不需有大量的離子補充，其所吸附的電荷密度低，電容量低，電荷的阻礙性因受前述塗層的影響，間接影響電雙層區電荷前進的速率，所以電阻性增加。而圖 13(b)為離子滲透入環氧基面漆內的情形，離子於面漆內部較為多量，使得面漆感應電荷密度的能力較增加，所以塗層之電容值增加，其電荷密

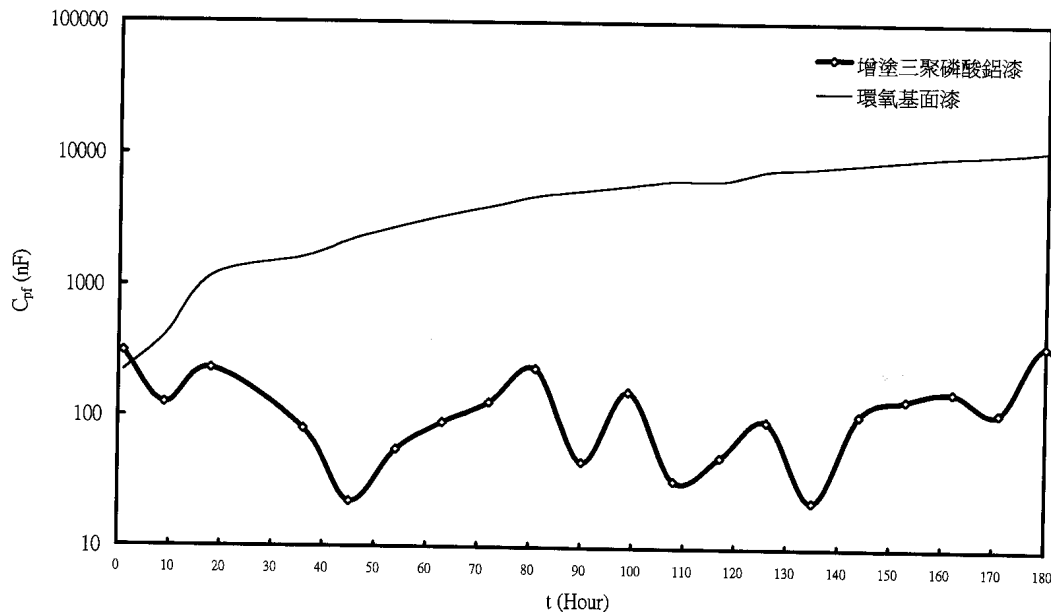


圖 12 試片經塗以環氧基面漆與增塗三聚磷酸鋁漆後的塗裝層電容(C_{pf})比較

Fig.12 Time dependence of C_{pf} , coating film capacity, for the corrosion performance of specimen with and without aluminum tripolyphosphate cating.

度亦增加，相對的導電性增加，使得塗層電阻性下降，塗層較不具保護性，而允許較多量的離子通過與鋼材反應，所以電雙層區需較大量的離子補充，此外的電雙層區堆滿了離子，所以電雙層區的電荷密度增加，電雙層電容值上升，離子受阻礙性小，其電阻值亦跟著下降。

四、結論

環氧基面漆的塗裝層電阻較環氧基三聚磷酸鋁漆低，所以環氧基面漆的耐蝕能力較差，環氧基面漆受破壞隨著時間的變化可區分為開始腐蝕狀態，而不穩定被動抗蝕狀態，再穩定被動抗蝕狀態，雖然穩定被動抗蝕狀態區域的阻抗性比不穩定被動狀態區低，但對於要求穩定性高的材料表面而言應以此區為佳；再增塗三聚磷酸鋁漆的破壞進行步驟隨著時間的變化可分為活性區，而鈍化區，再漸進反應區，於工作時間的考慮可以鈍化區得到最佳的抗蝕狀況，雖然活性區的阻抗值優於鈍化區，但活性區的阻抗值下降斜

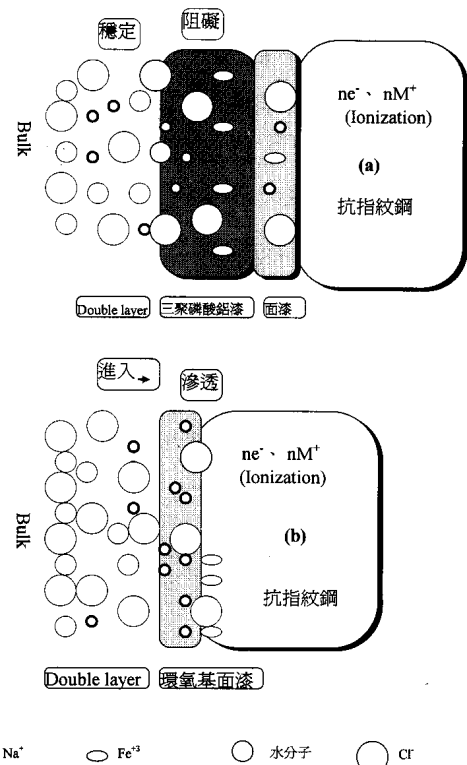


圖 13 離子進入塗層區的程度與電雙層區堆積離子的關係。(a)增塗三聚磷酸鋁漆對離子的阻礙 (b)離子滲透入面漆內的情形

Fig.13 Schematic for corrosion performance of the coating layers (a) protected (b) failed.

率太大將影響材料表面的不穩定性。若僅塗以環氧基面漆則其塗層電容值較增塗三聚磷酸鋁漆高，表示環氧基面漆較易溶解於人工海水中，若增塗三聚磷酸鋁漆可改變此現象，因此對於抗指紋鋼材的塗裝防蝕多增塗一道三聚磷酸鋁漆顯然是有極佳的效果。

五、誌謝

感謝中國鋼鐵公司提供塗裝鋼片，並感謝樊其芬教授生前對本研究樣品之獲取與聯繫方面費盡心力，僅以本文慰她在天之靈。

參考文獻

1. F. Mansfeld, Corrosion Science, 36(1981) 301.
2. J. H. Wang, F. I. Wei, and H. C. Shih, Corrosion Science, 53 (1997) 206.
3. T. Watanabe, M. Omura, T. Honma and T. Adaniya, SAE Tech. Pap. Series No. 820424. Detroit. MI (1982).
4. D. C. Silverman and J. E. Carrico, Corrosion Science, 44(1988) 280.
5. G. W. Walter, Corrosion Science, Vol. 26(1986) 681.
6. D. F. Wei, Chatterjee and D. A. Jones, Corrosion Science, 51(1995) 97.
7. R. Romagnoli and V. F. Vetere, Corrosion Science, 51(1995) 116.
8. Marion Dattilo, Corrosion Science, 26(1986) 18.
9. W. F. Smith, Materials Science and Engineering, PWS PUBLISHING COMPANY, New York, (1994) 562.
10. F. Mansfeld, Corrosion Science, 29(1973) 397.
11. John R. Scully, J. Electrochem. Soc., 136(1989) 979.
12. S. Feliu, J. C. Galvan and M. Morcillo, Corrosion Science, 30 (1990) 989.
13. S. I. Pyun, T. H. Yang, Journal of Applied Electrochemistry, 26 (1996) 953.
14. D. Weng, P. Jokei, Surface and Coatings Technology, 88(1996) 147.
15. M. Bojinov, R. Richeff, Journal of Applied Electrochemistry 26 (1996) 939.
16. L. M. Baugh, Electrochim. Acta 24(1979) 669.
17. D. E. Hall, Plat. Surf. Finish 71(1983) 59.
18. T. Adaniya, Sheet Metal Ind Int 12(1987) 73.
19. D. D. Macdonald and S. I. Smedley, Electrochim. Acta 35(1990) 1949.
20. M. Urquidi and D. D. Macdonald, ibid 132 (1985) 555.
21. O. E. Baarcia and O. R. Mattors, Electrochim. Acta 35(1990) 1003.