

## 鋅-鋁合金熔射之耐蝕性評估

張家華、柏宏基、吳貞欽、林義宗

### The Anti-Corrosion Performance of Zn-Al Thermal Sprayed Coatings

C.H.Chang, H.J.Bor, J.C.Wu, and Y.T.Lin

#### 摘 要

鋅及鋁應用於鋼構物之防蝕已行之有年，鋁的優越防蝕性來自於其表面緻密的氧化膜，而鋅具有較高之電化學活性，使鋅形成犧牲陽極以保護底材。鋅-鋁熔射皮膜之防蝕機理與鋅相近，均為形成犧牲陽極以保護底材。本研究即在探討鋅-鋁熔射之防蝕特性，並與鋁熔射、鋅熔射作一比較。由鹽霧實驗及電化學測試結果顯示，鋅-鋁熔射皮膜之腐蝕速率較慢，腐蝕曲線亦較為平緩，其防蝕性能優於鋅熔射皮膜，但較鋁熔射皮膜稍差。

關鍵字: 鋅-鋁合金、熔射、防蝕。

#### ABSTRACT

Metal spraying has been utilized for the deposition of Zinc and Aluminum coatings for the corrosion protection of Steel. Aluminum coatings have the advantage of passive film formation. Zinc coatings have the advantage of electrochemical activity which enables them to provide excellent cathodic protection to Steel. The anti-corrosion mechanism of Zinc-Aluminum coatings are similar to Zinc sprayed. This paper evaluated the corrosion protective performance of Zinc-Aluminum coatings by salt spray (fog) accelerative and electrochemical test. The experimental results indicated that the corrosion rate and polarization curve of Zinc-Aluminum coatings are more slow than Zinc. The Zinc-Aluminum coatings exhibited combining the long-term protection of Aluminum and the cathodic protection performance of Zinc.

Keywords: Zinc-Aluminum Alloy, Thermal Sprayed Coating, Anti-Corrosion.

## 一、前言

鋅及鋁應用於鋼構物之防蝕已行之有年，鋅由於具有極佳的電化學活性，長久以來一直是鋼構物防蝕絕佳的材料，以鋅為犧牲陽極所發展出來的防蝕技術，包括熱浸鍍鋅、電鍍鋅、冷鍍鋅(有機鋅粉漆/無機鋅粉漆)、及鋅熔射等，這些防蝕技術均已廣泛應用於鋼材上。

鋁的優越防蝕性來自於其表面緻密的氧化膜，這層氧化膜可以減緩腐蝕的速率，進而達到長期防蝕的效果。雖然鋅與鋁都是鋼構物防蝕的絕佳選擇，然而鋅、鋁並非完美無缺，鋅的電化學活性是優點亦是缺點，較高的電化學活性使鋅形成犧牲陽極以保護底材。相對地，高的電化學活性亦使得鋅消耗速率極快，一旦鋅消耗殆盡，底材便會開始腐蝕。鋁雖然腐蝕速率較慢，但由於電化學活性不及鋅，因此對底材的伽凡尼保護亦相對降低，尤其是角隅處，一旦結構物或皮膜局部損傷時，腐蝕便由缺陷處開始，最終導致皮膜整個損壞。

台灣地處亞熱帶，四面環海，典型的海島型氣候。高溫、多雨、潮濕、高鹽份的環境，以及高度工業開發所產生的工業廢氣及污染物等都是外露設備腐蝕的主因。一般將腐蝕環境概略地區分為都市、鄉村、工業、海洋等四種腐蝕環境，這種區分法往往無法反映實際的腐蝕環境，實際的腐蝕環境可能上述一種或多種腐蝕環境的組合。如臨海的工業區，腐蝕環境是海洋性與工業性腐蝕環境的組合。國際標準組織於1992年發佈 ISO 9223 一大氣腐蝕環境分類標準規範，以量化的金屬腐蝕速率來區分腐蝕環境，如表(一)所示，以避免因腐蝕環境認知的差異，而造成防蝕設計及防蝕措施上的失當。國內研究單位曾針對台灣地區的大氣腐蝕狀況加以研究<sup>(1)</sup>，結果顯示，台灣地區除少數低污染區及工業開發密度較低的區域之外，其他大都屬於嚴重腐蝕環境。

## 常見的鋼(鐵)材防蝕方式有：

### (1) 有機塗料塗裝

使用有機塗料塗裝的優點在於簡便、價廉、快速且皮膜修補容易。皮膜與底材的鍵結為機械性鍵結，防蝕效果取決於皮膜的附著力，及皮膜阻絕外來腐蝕因子的能力。防蝕效果較差且須要經常維護是其主要缺點。

### (2) 電鍍

常見的防蝕鍍層為鍍鋅及鍍鎳，電鍍皮膜均勻，與底材為化學鍵結，鍵結強度佳，但受限於鍍槽的大小以及價昂的設備，大型鋼構物或需要厚膜的部位並不適合。

### (3) 熱浸

常見的熱浸鍍層有熱浸鍍鋁、熱浸鍍鋅(Galvanized)、及熱浸 55% 鋁-鋅(Galvalume)。由於熱浸鍍與底材的鍵結方式為冶金式鍵結，附著力最佳。但同樣受限於鍍槽的大小，大型的鋼(鐵)構物必須分批熱浸再行組裝。且必須於工廠內施工，而無法於現場施工。

### (4) 熔射

熔射依熱源的不同而區分為電漿熔射、電弧熔射、火焰熔射及高速燃氣熔射等<sup>(2)</sup>，熔射的材料可以是金屬、非金屬、塑膠、陶瓷以及瓷金等。常見的熔射材料為大氣防蝕用的鋁、鋅；以及海水浸漬用不鏽鋼、銅、蒙納合金等。熔射作業不僅可於工廠內施工，視實際需要亦可於現場施工。

金屬熔射可以提供鋼(鐵)材於嚴苛的腐蝕環境下長期的防蝕保護，根據美國銲接協會(AWS)所進行的火焰熔射19年防蝕研究報告<sup>(3)</sup>以及美國LaQue防蝕技術中心所進行的熔射皮膜海洋性環境34年性能評估報告<sup>(4)</sup>中指出，只有鋅與鋁熔射可以提供鋼(鐵)材構物於工業性環境及海洋性環境下19年的防

蝕保護。且期間並不需要任何的維護工作。也只有鋅與鋁熔射的防蝕方式可以應用於海水濺濺及海水浸漬的部位。

鋅熔射之所以能提供鋼材長期的防蝕保護，是因為鋅的電化學活性較高，在鋼材表面形成犧牲陽極，當腐蝕進行時，披覆在鋼材上的鋅會先腐蝕以保護底材。但由於鋅的電化學活性高，腐蝕速率亦快，一旦鋅消耗殆盡之後，對底材即失去保護作用。因此鋅熔射防蝕的年限，取決於鋅熔射的膜厚，膜厚愈厚則防蝕的壽限亦愈長。

鋁熔射的防蝕性來自於鋁表面所形成緻密的氧化膜，此氧化膜可以阻絕腐蝕因子的侵入，而達到長期防蝕的效果。然而，鋁的電化學活性不及鋅，對底材的伽凡尼保護效果亦不及鋅，一旦鋁皮膜上有瑕疵或缺陷時，腐蝕會由缺陷的部位開始，產生局部孔蝕 (Pitting) 的現象，進而導致整個皮膜損壞。

鋅與鋁熔射皮膜各有其優缺點，近來有結合鋅與鋁的特性所發展的鋅-鋁合金熔射，鋅－鋁合金兼顧了鋅、鋁的防蝕特性，而剔除兩者的缺點。商業常用的鋅－鋁合金組成通常為 95 % 鋅，5 % 鋁 (重量比) 及 85 % 鋅，15 % 鋁，由於 95 / 5 的鋅鋁合金特性與純鋅相似，文獻報告多以 85 / 15 鋅－鋁為主要研究對象。

國外研究機構曾針對不同的鋅鋁熔射皮膜進行評估<sup>(5,6)</sup>，鋅－鋁熔射可採用預熔的鋅－鋁合金線為材料，以電弧熔射或火焰熔射的方式製作，或以線徑不同的鋅、鋁線為材料，以電弧熔射的方式製成皮膜組成與鋅－鋁合金相似的仿鋅－鋁熔射皮膜，或採鋅/鋁複合熔射的方式製成皮膜 (鋅熔射皮膜上熔射一層鋁皮膜或鋁熔射皮膜上熔射一層鋅皮膜)。本文主要以火焰熔射方式，使用預熔的鋅－鋁合金線為材料，製作鋅－鋁熔射皮膜，並經由相關皮膜測試來評估鋅－鋁熔射的電化學特性及防蝕性能。

## 二．實驗步驟

電化學特性評估用試片的製作規格如表 (二) 所示，試片底材為 1010 低碳鋼，試片尺寸為 5X10 cm，表面經 G40 金鋼砂噴砂處理至呈白色金屬光澤，表面分別熔射純鋅、純鋁及 85 / 15 鋅－鋁合金，試片編號分別為 A、C、I、K，用來評估不同熔射材料的電化學特性。此外部分試片再經封孔處理，藉以評估有機塗裝對皮膜防蝕性能的影響，試片規格如表 (三)。

熔射後未經封孔處理的試片，先以丙酮去脂，測試用溶液為 3.5% 氯化鈉水溶液，由試藥級化學藥品與高純度去離子水 (18MΩ·cm) 配製，去離子水由 Milipore Mili-Q SP U.S.A 純水系統純化。電化學測試電極的暴露面積為 7cm<sup>2</sup>，儀器組合為恆電位儀 (CEG&GPC Model 273 U.S.A)，頻率響應分析儀 (CEG&GPC Model 1025 U.S.A)，使用白金為輔助電極，飽和甘汞電極 (SCE) 為參考電極。直流極化採用 EG&G M352 電化學腐蝕系統操控，分別進行動電位極化及線性極化曲線。此外為探討熔射試片經封孔處理後的電化學特性，本研究亦進行電化學阻抗圖譜 (Electro-chemical Impedance Spectroscopy, EIS) 測試，並以 EG&G M398 電化學腐蝕系統操控。頻率範圍由 100KHz—0.01Hz，實驗在開路電位下進行 (Open Circuit Potential)，AC 振幅為 5mV，每一階頻率內擷取五點數據。

鹽霧試驗用試片為 1020 鋼材，表面先經鋼砂噴砂處理至呈白色金屬光澤，表面 85 / 15 鋅－鋁單面熔射，部分試片經封孔/面漆塗裝處理，部分則未經任何處理。經封孔/面漆塗裝處理的試片在表面對角線以刀片劃 "X"，刀痕直達底材，以評估皮膜局部損傷的防護效果。部分試片邊緣以 3M 耐酸鹼膠布加以遮護，部分試片邊緣則未遮護作為比較。實驗依 ASTM B117 規範進行，每週觀察鹽霧試驗結果並記錄之，試片規格如表 (四)。

大氣曝露用試片製作與鹽霧試驗用試片相同，曝露地點為中科院新新營區 401 館頂樓，試片傾斜

仰角45度，面向北方，試片規格如表（五）。

### 三·結果與討論

#### (一)電化學評估結果

由於鋅、鋅-鋁、鋁等三種材料的電位均較鋼材為活性，因伽凡尼效應使熔射皮膜陽極化並同時釋出電子，而達到保護底材的效果。A、C、I、K四種試片在3.5%氯化鈉水溶液中之動電位極化曲線如圖1所示，編號試片係熔射純鋅，腐蝕電位最活性，編號K試片為熔射純鋁，因此腐蝕電位較鈍性，熔射鋅-鋁試片(編號A、C)的腐蝕電位則介於兩者之間。

圖1之極化曲線可區分為兩種型態，A、C、I三種試片之電化學反應為活性控制(Activation Control)，但當電位超過-800mV時，其陽極電位即逐漸趨近於極限值。K試片則為另一種型態，即在陽極部分有一明顯之鈍化現象。當電位達到-700mV時，鈍化層崩潰，電流急速增加。造成此種差異的原因為A、C、I試片分別熔射鋅-鋁及純鋅，二者之電化學性能相近，而K試片為熔射純鋁，因鋁表面易生成氧化膜而降低鋁熔射皮膜的化學活性，因此在極化曲線出現鈍化的現象。鋅-鋁合金中鋅含量高於鋁，因此鋅-鋁熔射的電化學性質亦較接近於鋅，A、C試片的膜厚雖然有所差異，但極化曲線並無明顯不同。

以低過電位極化方式，亦即一般通稱的線性極化法(Linear Polarization)或極化電阻法可區分熔射材料之活性、故本研究利用此法進行不同熔射材料之防蝕性評估。

圖2為不同熔射材料之腐蝕電流與時間之關係，圖中顯示，由於三種熔射材料皆屬活性材料，在腐蝕初期，皮膜表面金屬溶解後，表面粗糙度增加，因此所有試片的腐蝕電流在初期呈現上升的趨勢。待時間增長後，隨著皮膜表面腐蝕生成物逐漸累積，腐蝕電流亦隨之降低，最後呈現穩定狀態。

圖3為腐蝕電位與時間之關係，比較圖2與圖3發現，腐蝕電流增加時，表示熔射材料處於活性狀態，因此腐蝕電位朝負值方向移動。當熔射皮膜產生腐蝕時，因腐蝕生成物的累積，使皮膜的活性降低，此時腐蝕電流下降，腐蝕電位朝正值方向移動。這種現象可觀察編號I熔射純鋅試片得到驗證，由於鋅活性最高，因此在浸泡初期腐蝕電流亦最高，經過35天的浸泡之後，熔射鋅的腐蝕電流卻明顯下降，腐蝕電位則急遽升高達100 mV，腐蝕電位最後甚至較鋅-鋁為正，這代表皮膜表面活性已大幅降低。觀察試片表面亦可發現，如照片1~4所示，鋅熔射試片上的腐蝕生成物最多，鋅-鋁熔射試片次之，鋁熔射試片上則僅有少許腐蝕生成物。膜厚90  $\mu\text{m}$ 的鋅熔射試片上已有紅鏽產生。

由於鋁的活性不及鋅及鋅-鋁合金，因此腐蝕電流最低，代表鋁的腐蝕速率最低，這也是鋁對鋼材的伽凡尼保護不及鋅或鋅-鋁合金的原因。由於鋁與鐵材之間的電位差較小，因此鋁熔射皮膜的防蝕性來自於較低的腐蝕速率以及緻密的氧化層。由於鋁熔射皮膜對鋼材的伽凡尼保護有限，一旦鋁熔射皮膜上有刮痕、孔洞或是缺陷時，皮膜的防蝕性能即大為降低，因此鋁熔射皮膜通常須加以封孔處理，以延長皮膜的防蝕壽限。

鋅-鋁熔射皮膜的腐蝕電流如預期般介於鋅與鋁之間，而與鋅相近，不同的是鋅-鋁熔射皮膜的腐蝕電流呈穩定狀態，就防蝕設計的觀點來說，鋅-鋁熔射皮膜的使用壽限較易評估。由於鋅-鋁合金的成份中大多為鋅，因此防蝕機制與鋅相近。合金的鋁成份則有減緩腐蝕速率的效果。值得注意的是鋅-鋁合金中富鋅相的腐蝕速率較富鋁相為快，長期下來，富鋅相腐蝕後產生的孔洞是鋅-鋁熔射皮膜鬆脫剝落的主因<sup>(6)</sup>。

由圖2可以發現，試片A(膜厚100  $\mu\text{m}$ )在浸泡初期腐蝕電流較試片C(膜厚200  $\mu\text{m}$ )高出許多，但經過7天的浸泡之後，二者的腐蝕電流已相差無幾，顯示膜厚100  $\mu\text{m}$ 的鋅-鋁熔射皮膜即可滿足一般防蝕需求。不同組成的鋅-鋁合金其防蝕

效果亦不同。當鋅－鋁合金中鋅成份增加時，皮膜的伽凡尼保護效果會遞增，相對地增加合金中鋁的成份則腐蝕速率會遞減。相關的研究文獻<sup>(7)</sup>指出含 55% 鋁的鋅－鋁合金，其防蝕效果最佳。

封孔可以延長熔射皮膜的使用壽限，不同塗層膜厚下的 Bode 圖譜顯示圖 4，當漆膜膜厚達 90  $\mu\text{m}$  時，其阻抗值約  $2 \times 10^6 \Omega\text{cm}^2$ ，當漆膜膜厚達 130  $\mu\text{m}$  時，其阻抗值約  $1.5 \times 10^7 \Omega\text{cm}^2$  兩者之間差異甚大，當漆膜膜厚增加時，其阻抗值會隨之提高。由圖 5 顯示兩個時間常數(Time Constant)，代表漆膜有缺陷，無法阻絕外在的腐蝕因子，造成這種現象的原因是熔射後表面粗度增加，粗糙的表面雖然有助於漆膜的附著，但相對地漆膜膜厚必須提高以填補表面的凹陷。漆膜膜厚無法填補表面凹陷時，封孔處理便失去實質的意義。

將封孔後的鋅－鋁熔射試片浸泡於 3.5% 氯化鈉水溶液中，經 41 天後再進行電化學阻抗量測，結果顯示阻抗值並無明顯衰退，如圖 6 所示，顯示金屬熔射可以增加有機塗層的附著力，因此熔射後再經封孔處理的試片，其防蝕能力不會因浸泡時間增加而急速衰退。

## (二) 熔射皮膜附著力測試結果

熔射皮膜的附著力依 ASTM D4541 規範進行，鋁熔射皮膜與鋅－鋁熔射皮膜的附著力相近，試驗結果如表 6 所示。

## (三) 鹽霧試驗結果

鹽霧試驗依 ASTM B117 規範進行，鹽霧試驗結果如表 7 所示，未封孔處理的鋅－鋁熔射試片上有局部的腐蝕物生成，在表面形成突出的腫瘤，四片未封孔處理的試片中以 ZA6 的腐蝕生成物最多，試片顏色由熔射後的白色金屬光澤變為淡灰色。底材並未產生任何鏽蝕，經封孔處理後的鋅－鋁熔射皮膜表面完好，試片劃 X 記處有些微腐蝕物生成，所有試片的漆膜均完好，無任何鼓泡及剝落的現象。

鋁熔射後未封孔的試片經 288 小時的鹽水噴霧之後，試片表面產生三點紅色鏽斑，鏽斑的直徑均小於 1mm，皮膜上雖然有些微的腐蝕生成物。隨著鹽霧時間增加，鏽斑的面積亦隨之增加，但鏽斑的數量並未隨著時間增長而遞增。這也驗證了局部孔蝕是鋁熔射皮膜失效的主因。

由鹽霧試驗可以發現，經 3144 小時鹽水噴霧之後，未經封孔的鋅－鋁熔射試片雖然有少許的腐蝕生成物，但底材並無任何鏽蝕現象。即使在試片表面劃出刮痕，底材仍無鏽蝕產生，由此可見鋅－鋁熔射皮膜具有與鋅熔射相近的犧牲陽極效果，對局部的刮痕具有保護效果，且腐蝕曲線較鋅平緩，可以減緩陽極消耗的速度。

## (四) 大氣曝露試驗結果

鋅鋁熔射試片經 39 個月的大氣曝露試驗後，未封孔處理的鋅－鋁熔射皮膜表面顏色由熔射後的白色金屬光澤轉變為淡灰色，熔射皮膜完好，僅有少許的腐蝕生成物。經封孔處理後的鋅－鋁熔射皮膜則完好如初，熔射皮膜無任何腐蝕現象，漆膜無鼓泡或是剝落。

## (五) 封孔的影響

由鹽霧試驗結果顯示，經封孔後的鋅－鋁熔射皮膜均完好如初，這說明了封孔處理對熔射皮膜的重要性。封孔可提供熔射皮膜多一層的保護，延長皮膜的使用壽限。由於熔射後的表面粗糙，腐蝕因子如鹽份、灰塵易嵌陷於皮膜表面，封孔除了有減少腐蝕因子嵌陷的作用，同時可充填熔射層的孔隙，阻絕腐蝕因子侵入底材。封孔劑中的防蝕顏料亦具有抑制腐蝕的功能。鋁熔射皮膜即使不封孔，表面自然形成的氧化膜同樣具有封孔的效果，但氧化膜也是腐蝕因子侵入皮膜的主要途徑，鋁熔射皮膜通常由氧化膜開始破壞，皮膜因腐蝕而漸漸鬆散進而剝落。由電化學性能測試發現，封孔必須達到一定的膜厚方具保護效果，有效的封孔膜厚必須倍於表面粗度，以表面粗度 50  $\mu\text{m}$  為例，封孔膜厚必

須大於 $150\ \mu\text{m}$ 才足以填補表面的凹陷。

#### 四·結論

- (一) 鋁、鋅、鋅-鋁熔射都是鋼(鐵)材長期防蝕極佳的材料，與傳統的有機塗裝比較，熔射的初期成本雖略高於有機塗裝，但熔射後幾乎不需要任何維護，就長期防蝕的效益來說，熔射防蝕優於傳統的有機塗裝，尤其是維護不易或無法保養的部位。
- (二) 鋁熔射皮膜廣泛地應用於美國海軍艦艇之防蝕塗裝，鋅及鋅-鋁熔射則應用於大型鋼構物的大氣防蝕。熔射材料之選擇視作業環境、操作條件及防蝕需求而定。皮膜的緻密性影響鋁熔射皮膜的防蝕性能，因此鋁熔射皮膜一般不得低於 $75\ \mu\text{m}$ <sup>(8)</sup>。鋅熔射與鋅-鋁熔射皮膜的防蝕取決於膜厚，皮膜膜厚須參考實際腐蝕環境及防蝕需求來訂定。在溫和的腐蝕環境下， $25\ \mu\text{m}$ 的鋅熔射即可滿足一般防蝕需求。
- (三) 鋅-鋁熔射皮膜的防蝕機制與鋅相近，因此防蝕壽限取決於皮膜的厚度。與鋅不同之處，鋅-鋁熔射皮膜的腐蝕速率較慢，腐蝕曲線較平緩，較慢的腐蝕速率代表相同的膜厚之下，鋅-鋁熔射的防蝕效果會優於鋅熔射。
- (四) 相較於鋅或鋅-鋁熔射皮膜，鋁熔射皮膜的腐蝕速率最慢，具有長期防蝕的效果。由於鋁熔射的防蝕性來自緻密的氧化膜，一旦皮膜局部損傷或是產生瑕疵時，腐蝕因子便會侵入底材，產生孔蝕的現象。而熔射作業時，熔融液滴在到達底材之前，飛行途中即在液滴表面形成氧化膜，這層氧化膜隨熔融液滴衝擊至底材，形成氧化膜的網絡，也提供了腐蝕因子進入底材的途徑。鋁熔射皮膜局部孔蝕的現象，使得鋁熔射皮膜的壽限較難以簡單的腐蝕速率來換算。基於上述理由，鋁熔射皮膜應加以封孔處理以延長皮膜使用壽限。

#### 參考文獻

1. 陳天賜、楊巨平、陳新北；台灣地區大氣腐蝕調查報告，第九屆亞太腐蝕控制會議，6-9，Nov. (1995)。
2. B. Fitzsimons, Thermal Spray Metal Coatings for Corrosion Protection, Corrosion Management, Dec. (1995).
3. Corrosion Tests of Flame-Sprayed Coated Steel 19-Year Report, AWS (American Welding Society), (1974).
4. R. A. Sulit, AWS Guide for the Protection of Steel with Thermal Spray Coatings of Aluminum and Zinc and Their Alloys and Composites, National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, 7-11, June (1993)。
5. B. A. Shaw and P. J. Moran, Characterization of the Corrosion Behavior of Zinc-Aluminum Thermal Spray Coatings, MP, Nov. (1985)。
6. B. A. Shaw and A. G. S. Morton, Marine Thermal Spray Coatings? Marine Performance and Mechanisms, Corrosion Branch David Taylor Research Center Bethesda, Maryland, USA.
7. J. C. Zoccola, H. E. Townsend, A. R. Borzillo and J. B. Horton, Atmospheric Corrosion Behavior of Aluminum-Zinc Alloy-Coated Steel, ASTM STP 646, (1978).
8. E. R. Sampson, Thermal Spray Coatings for Corrosion Protection: An Overview, MP, Dec. (1997)。

鋅-鋁合金熔射之耐蝕性評估

表1. 腐蝕速率對照表

Table 1. contrast between corrosion classification and corrosion rate

金屬腐蝕速率					
腐蝕性類別	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ $\mu\text{m}/\text{y}$	$r \leq 10$ $r \leq 1.3$	$r \leq 0.7$ $r \leq 0.1$	$r \leq 0.9$ $r \leq 0.1$	忽略不計 ----
C2	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ $\mu\text{m}/\text{y}$	$10 < r \leq 200$ $1.3 < r \leq 25$	$0.7 < r \leq 5$ $0.1 < r \leq 0.7$	$0.9 < r \leq 5$ $0.1 < r \leq 0.6$	$< r \leq 0.6$ ----
C3	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ $\mu\text{m}/\text{y}$	$200 < r \leq 400$ $25 < r \leq 50$	$5 < r \leq 15$ $0.7 < r \leq 2.1$	$5 < r \leq 12$ $0.6 < r \leq 1.3$	$0.6 < r \leq 2$ ----
C4	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ $\mu\text{m}/\text{y}$	$400 < r \leq 650$ $50 < r \leq 80$	$15 < r \leq 30$ $2.1 < r \leq 4.2$	$12 < r \leq 25$ $1.3 < r \leq 2.8$	$2 < r \leq 5$ ----
C5	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ $\mu\text{m}/\text{y}$	$650 < r \leq 1500$ $80 < r \leq 200$	$30 < r \leq 60$ $4.2 < r \leq 8.4$	$25 < r \leq 50$ $2.8 < r \leq 5.6$	$5 < r \leq 10$ ----

表2. 未封孔之熔射試片規格

Table 2. Specification of unsealed thermal spraying specimens

試片編號	底材	熔射層	膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	表面塗裝
A	1010 碳鋼	鋅-鋁	100	無
C	1010 碳鋼	鋅-鋁	200	無
I	1010 碳鋼	鋅	90	無
K	1010 碳鋼	鋁	90	無

表3. 熔射後封孔試片規格

Table 3. Specification of sealed thermal spraying specimens

試片編號	底材	熔射層	膜厚 $\mu\text{m}$	表面塗裝
X1-1	1010 碳鋼	鋅-鋁	80	封孔劑 $30 \mu\text{m}$ 底漆 $30 \mu\text{m}$ 面漆 $30 \mu\text{m}$
X1-2	1010 碳鋼	鋅-鋁	80	封孔劑 $30 \mu\text{m}$ 底漆 $30 \mu\text{m}$ 面漆 $30 \mu\text{m}$
X2-1	1010 碳鋼	鋅-鋁	90	封孔劑 $30 \mu\text{m}$ 底漆 $30 \mu\text{m}$ 面漆 $30 \mu\text{m}$
X2-2	1010 碳鋼	鋅-鋁	90	封孔劑 $30 \mu\text{m}$ 底漆 $30 \mu\text{m}$ 面漆 $30 \mu\text{m}$

註：封孔劑為虹牌 1020 合金底漆

底漆為 Randoiph MIL-P-23377 TYPE1 底漆

面漆為長城牌 MIL-C-83286 PU 面漆

表4. 鹽霧試驗試片規格

Table 4. Specimens specification for salt spray (fog) test

試片編號	底材	熔射層	膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	表面塗裝
ZA1	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	無
ZA2	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	無
ZA3	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	1020/83286
ZA4	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	1020/83286
ZA5	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	無
ZA6	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	無
ZA7	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	1020/83286
ZA8	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	1020/83286
AA1	1020 碳鋼	鋁	90	無

註：1020 為虹牌 1020 合金底漆

83286 為長城牌 MIL-C-83286 PU 面漆

表5. 大氣曝露試驗試片規格

Table 5. Specimens specification for outdoor atmospheric exposure test

試片編號	底材	熔射層	膜厚 (μm)	表面塗裝
ZB1	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	無
ZB2	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	無
ZB3	1020 碳鋼	鋅-鋁	100	1020/83286
ZB4	1020 碳鋼	鋅-鋁	200	1020/83286

註：1020 為虹牌 1020 合金底漆  
83286 為長城牌 MIL-C-83286 PU 面漆

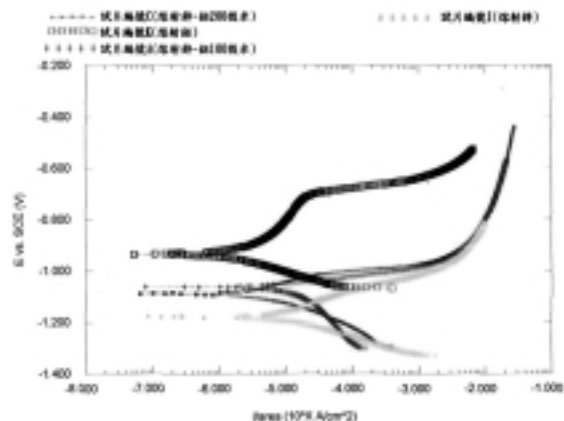


圖1. 四種熔射試片在 3.5%NaCl 水溶液中之動電位極化曲線

Fig.1 polarization curve of four different specimens after immersion in 3.5% NaCl solution

表6. 未封孔之熔射試片規格

Table 6. Specification of unsealed thermal spraying specimens

熔射層	附著力測試結果 (psi)			
	鋅-鋁	1179	914	1219
鋁	1179	1016	1016	996

\*：熔射皮膜未完全拔起，數據僅供參考

表7. 熔射後封孔試片規格

Table 7. Specification of unsealed thermal spraying specimens

編號	鹽水噴霧時間(小時)																	
	24	72	288	456	648	792	960	1128	1296	1464	1632	1800	1968	2136	2472	2808	3144	
ZA1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ZA8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
AA1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：皮膜表面完好  
×；表面有輕微腐蝕物生成

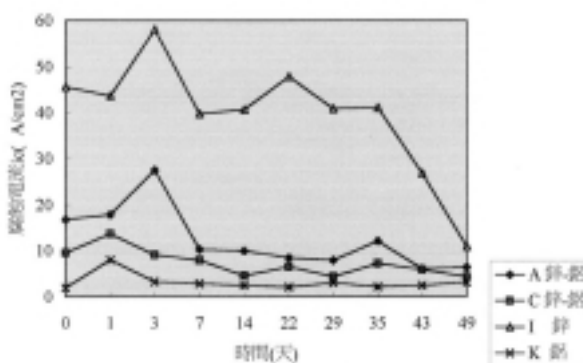


圖2. 四種熔射試片腐蝕電流與時間關係  
Fig.2 Curves of corrosion current vs time of four different specimens



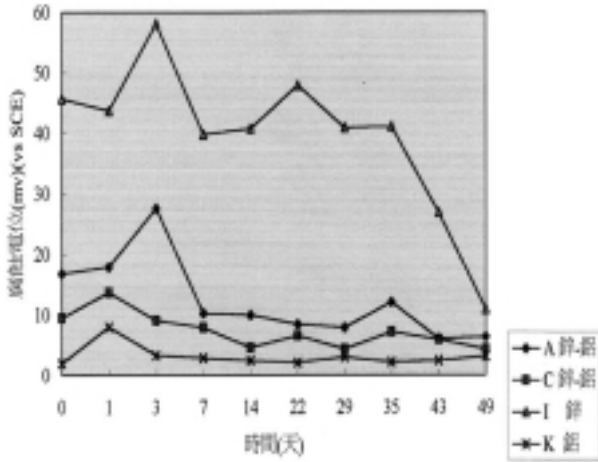


圖3. 四種熔射試片腐蝕電位與時間關係  
Fig.3 Curves of corrosion potential vs time of Four different specimens

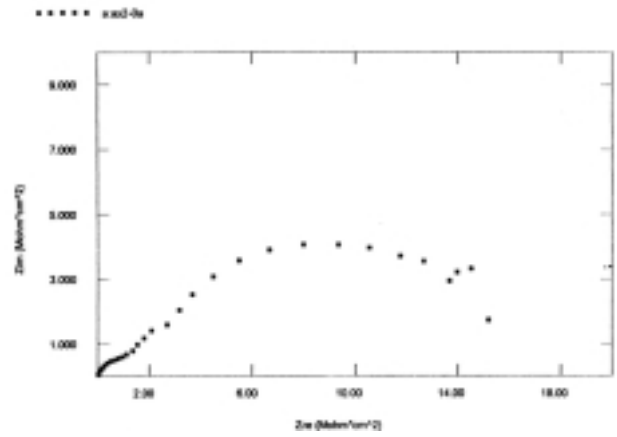


圖5. 封孔膜厚  $130 \mu\text{m}$  的鋅-鋁熔射試片在 3.5%NaCl 水溶液之Nyquist 圖譜  
Fig.5 Nyquist plot for sealed Zn-Al coating after immersion in 3.5% NaCl solution

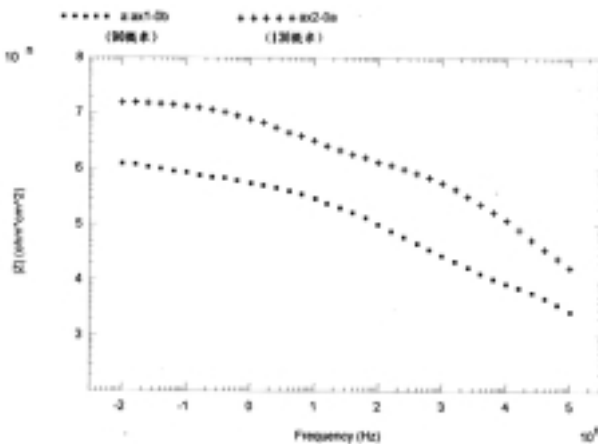


圖4. 不同封孔膜厚的鋅-鋁熔射試片在 3.5% NaCl 水溶液之Bode 圖譜  
Fig.4 polarization curve of four different specimens after immersion in 3.5% NaCl solution

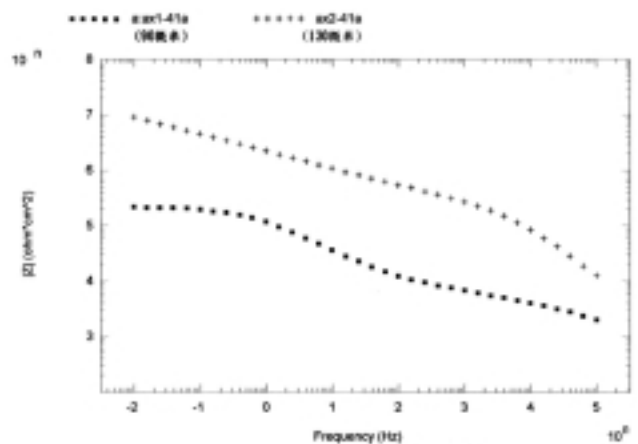
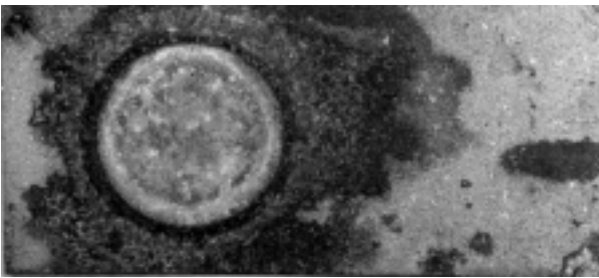


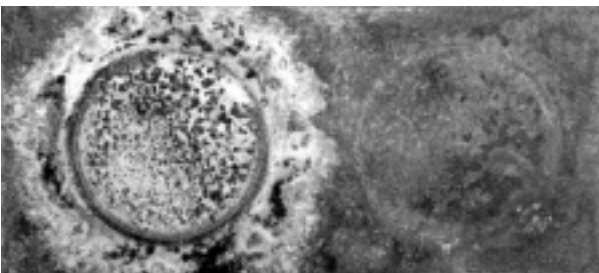
圖6. 不同封孔膜厚的鋅-鋁熔射試片經 3.5%NaCl 水溶液浸泡41天後之Bode 圖譜  
Fig.6 ode plots for Zn-Al coating with distinct sealing thicknesses after 41 days of immersion in 3.5%NaCl solution



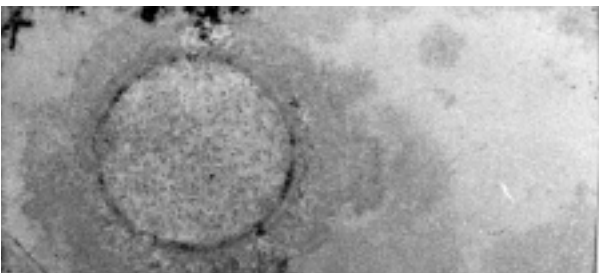
照片1. 電化學測試結果，試片編號A  
Photo 1 Electrochemical testing result, Specimen A



照片2. 電化學測試結果，試片編號C  
Photo 2 Electrochemical testing result, Specimen C



照片3. 電化學測試結果，試片編號I  
Photo 3 Electrochemical testing result, Specimen I



照片4. 電化學測試結果，試片編號K  
Photo 4 Electrochemical testing result, Specimen K