

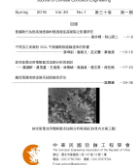


防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程



10.6376/JCCE.201803_30(1).0004

離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估 Corrosion Evaluation of Coating for Off Shore Wind Turbine Tower

吳興練

Hsing-Lien Wu

摘要

本文研究以底漆為富鋅底漆、鋅鋁與鋁熔射、環氧樹脂防蝕漆等離岸風立發電機塔架塗裝系統。依據 ISO 12944、NORSOK M501 的試驗方法進行測試。研究結果顯示；各塗裝系統皆可符合 ISO 12944 的要求，如要呼應台電相當於 40 年海上大氣環境的曝露量的試驗，以耐蝕底漆高膜厚塗裝的為佳，鋅粉底漆塗裝系統次之，鋅鋁與鋁熔射塗裝系統，可能因為常濕的鹽霧環境，熔射金屬層在氯離子的環境中無法建立鈍化態，溶解較快，導致它上面的塗膜反而剝離較大，但它的銹水顏色是白色的，腐蝕應只在熔射層。鋅鋁與鋁熔射塗裝系統可符合 NORSOK M501 老化試驗的要求，耐蝕底漆高膜厚塗裝同時符合 NORSOK M501 海水浸泡、陰極防蝕塗膜試驗。鋅鋁與鋁熔射金屬層可能是該陰極防蝕保護電位是針對鋼鐵的，而不是對鋅鋁/鋁熔射層的，鋅、鋁較活潑，對曝露的鋅鋁/鋁熔射層保護不足，影響到陰極防蝕塗膜塗膜附著的表現。

關鍵詞：離岸風機；富鋅底漆；鋅鋁與鋁熔射。

Abstract

In this paper, the off shore wind turbine tower coating systems had been evaluated. The coatings include Zn-rich primer, Zn-Al and Al thermal spray, epoxy resin anti-corrosion primer. ISO 12944, NORSOK M501 test standards were followed. The results showed that all the coating systems could meet the requirements of ISO 12944. For Tai-power expectation of 40-years off shore atmospheric exposure, the anti-corrosion primer with heavier film thickness was recommended, Zn-rich primer coating performed secondly. The Zn-Al and Al thermal spray metal layers failed to establish a passive state in chloride ions contained wet salt spray condition. The dissolutions of the thermal spray coatings were faster than the other coatings, which resulted in a wider coating

收到日期：2017 年 9 月 23 日

修訂日期：2017 年 9 月 28 日

接受日期：2018 年 3 月 20 日

中鋼公司 綠能與系統整合研究發展處 產品應用技術組

Product Application Technical Section, Green Energy & System Integration Research & Development Dept., China Steel Corporation.

*聯絡作者：140160@mail.csc.com.tw

peeling length. However, the rust formed on the thermal spray metal layers was in red color, which indicates that the corrosion was only happened on the coating. Zn-Al and Al coating system could meet the requirements of aging test of NORSOK M501. The corrosion-resistant primer with heavier film thickness coating performed well in seawater immersion and cathodic corrosion coating test of NORSOK M501. Due to the cathodic corrosion protection potential had been designed for steel corrosion immunity, the Zn-Al and Al coating systems were found having a poor performance in the cathode corrosion coating test. It has been known that Zn-Al and Al coating are active materials, therefore the protection of exposed Zn-Al and Al layers should be insufficient for cathodic protection for wind turbine underwater structure.

Keywords: Off shore wind turbine; Zinc Rich Primer; Zn-Al & Al Thermal Spray.

1. 前言

配合政府推動的「千架海陸風力機」市場前景下，業屆紛紛成立風電事業，準備發展高達新台幣 7,000 億元產值的風力發電產業。主要投資項目包括開發基地、訂造風力發電設備所需的平台船、起重船、打樁船以及海事工程零件，包括葉片、海底電纜、塔架及機艙設備等。

由於離岸風電的防蝕的要求高，通常依據 ISO 12944、NORSOK M501 (ISO 20340) 等規範規定之測試方法。本研究將進行相關離岸風機結構塗裝系統性能之測試與評估，試圖解析不同塗裝系統的耐蝕性表現，做為適用於海洋大氣環境與水下環境塗裝系統之規劃參考。

2. 研究方法

2.1 風電的結構與防蝕環境分類

岸風機的主要結構，可分為葉片、主發電機及塔架，塔架深植入海中的基礎等部分。所曝露的環境可分為大氣腐蝕、潮間帶乾濕循環腐蝕、海下結構之海水腐蝕及海土腐蝕，其中以飛沫帶與潮汐帶腐蝕性最高。臺電對示範機組防蝕能力的要求為規格條件符合 ISO12944-2^[1] 等級規定；

- (1) 風機外觀表面直接與大氣環境接觸部分及感測器須符合 C5M 等級以上。
- (2) 風機內部表面直接接觸外部空氣但非大面積曝露於大氣中者，如輪殼內部表面部分，須符合 C3 等級以上。
- (3) 風機內部表面不直接接觸外部空氣者(機艙內

部機構)，須符合 C3 等級以上。

- (4) 風機內部零組件，如發電機、變壓器和齒輪箱等，若機艙與塔架空間已為封閉環境設計，則無須特別塗裝指令。
- (5) 基座亦須符合 ISO12944-2，防蝕等級 Im2 等級以上。

大氣腐蝕環境可劃分為 6 個等級^[1]：C1 (非常低)；C2 (低)；C3 (中等)；C4 (高)；C5-I (很高，工業環境)；C5-M (很高，海洋環境)，如表 1。水和土壤腐蝕環境則劃分為 3 個等級：Im1，淡水；Im2，海水或鹽水；Im3，土壤。風電塔架的外表屬 C5M，浸水區域 Im2，內表面 C4。國際上採用 ISO 12944 標準對腐蝕環境分類、塗層體系選擇及性能評價，而針對海上結構物歐洲採用 NORSOK M-501^[2] 標準，美國為 NACE SP0108^[3] 等規範。而以 NORSOK M-501 最被廣泛地接受。就塔架而言，與大氣環境接觸部分須符合 C5M 防蝕等級以上，基座須符合 Im2 防蝕等級以上。

2.2 試片的製備

ISO 12944 與 NORSOK M501 所提議的風機塗裝系統眾多，如富鋅底漆，熱浸鍍鋅、熱熔射(鋁、鋅鋁)，環氧樹脂、聚氨樹脂、氟碳樹脂等，以及各塗層的厚度變化，底材的種類。塗裝試片的製作底材為碳鋼一種，底漆為富鋅底漆、鋁(鋅)熔射、環氧樹脂防蝕漆三種，中上塗為聚氨樹脂、氟碳樹脂等。相關的試驗塗裝試片製備資料如下。

離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估

表1 ISO 12944 環境分類。

Table1 Environment types of ISO 12944.

腐蝕度 類別	單位面積上品質的損失（第一年曝露後）				典型環境（僅作參考）
	低碳鋼		鋅		
	重量損失 g/m ²	厚度損失 μm	重量損失 g/m ²	厚度損失 μm	
C1 (很低)	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1	加熱的建築物內部，空氣潔淨， 如辦公室、商店、學校和賓館等
C2 (低)	10~200	1.3~25	0.7~5	0.1~0.7	大氣污染較低，大部分是鄉村 地帶
C3 (中)	200~400	25~50	5~15	0.7~2.1	城市和工業大氣，中等的二氧化 化硫污染，低鹽度沿海區域
C4 (高)	400~650	50~80	15~30	2.1-4.2	高鹽度的工業區和沿海區域
C5I 很高(工業)	650~1500	80~200	30~60	4.2-8.4	高鹽度和惡劣大氣的工業區域
C5M 很高(海洋)	650~1500	80~200	30~60	4.2-8.4	高鹽度的沿海和離岸地帶

表2 試片的大氣帶塗裝系統。

Table 2 Coating systems of test specimens for atmosphere zone.

塗裝系統	(B11)	(B12)	(B13)
表面處理	Sa2.5, Ra >50μm		Sa2.5, SM/RZ ≤ 3, RZ > 65
底塗	Z-120HB(無機鋅粉) 75μm	A-490I(高固份環氧) 150μm	金屬熔射 鋅 85 鋁 15 熔射 300μm
薄塗	A-490I, 25μm	---	環氧封孔劑 250 g/m ²
中塗	A-490I(高固份環氧) 160μm	A-490I(高固份環氧) 180μm	環氧鱗片 A-420N 120μm+120μm
面塗	I-380(PU)50μm+ F-2000(氟碳)30μm	I-380(PU)50μm+ F-2000(氟碳) 30μm	I-380(PU)50μm+ F-2000(氟碳) 30μm
總膜厚	340μm	410μm	鋅鋁熔射 300μm +320μm

表3 飛沫/潮汐帶塗裝系統。

Table 3 Coating systems of test specimens for splash and tide zone.

塗裝系統	(B21)	(B22)相同於 大氣帶的(B13)	TSAC
表面處理	Sa2.5, Ra >50μm	Sa2.5, SM/RZ ≤ 3, RZ > 65	
底塗	柏特耐 R 底漆(PU)30μm	金屬熔射鋅 85 鋁 15 熔射 300μm	金屬熔射鋁 300μm
薄塗	---	環氧封孔劑 250 g/m ²	環氧封孔劑 250 g/m ²
中塗	---	環氧鱗片 A-420N 120μm+120μm	環氧鱗片 A-420N 120μm+120μm
面塗	柏特耐 S-100 面漆 (PU)2000μm	I-380(PU)50μm+F-2000(氟碳) 30μm	I-380(PU)50μm+F-2000(氟碳) 30μm
總膜厚	2030μm	熔射 300μm + 320μm	鋁熔射 300μm + 320μm

2.3 試驗方法

(1) ISO 12944 : C5M 區域的耐久性塗膜性能測試為水冷凝試驗(ISO 6270)720hrs 與鹽水噴霧試驗(ISO 7253)1440hrs(表 4)。分別說明如下：

- A. 水冷凝試驗(Water condensation)：有三種 (A)40°C 100%RH 恆溫恆濕試驗(humid)；(B) 乾-濕循環試驗(Dry and wet cycling)：(40°C 100%RH)8hrs + (室溫)16hrs 與(C)濕-濕循環試驗(wetting cycling)：(40°C 100%RH)8hrs + (室溫 100%RH)16hrs。本計劃的選擇為(C)濕-濕循環試驗。
- B. 鹽水噴霧試驗(Salt fog(spray))：35°C，5%NaCl。
- C. 純水浸漬試驗(Pure water immersion)：40°C 離子水(pH5~7.5，<0.5ms/m)，容器須有通空氣或攪拌，水質導電度要<2ms/m，超過要換水。

(2) ISO 20340^[4] (NORSOK M501)的試驗方法進行評估如表 4。

A. 老化試驗(Ageing)

- a. 試片準備：大小與刮劃如的圖 1。測試的刮痕：所用的劃線工具應是可以重複利用的。如果不能，刮劃線工具應是 ISO 2409 中 4.1.1 條中所描述的(單刃割刀)。刮劃痕應平直，至少 50mm 長。另外，刮痕應距任何板邊緣至少 20mm 距離，整個刮劃痕必須均勻刮劃透直至底材。
- b. 刮痕周圍腐蝕的評估：試驗後，測量橫過刮劃痕的腐蝕的最大寬度 C 值(毫米計量)，計算底材上刮痕處腐蝕蔓延 M 值，用下面公式計算： $M = (C - W) / 2$ ；W 是刮劃痕的原始寬度(毫米計量)。

表 4 ISO 12944-6 鋼材塗裝系統的測試方法與時間。

Table 4 Test methods and times of coated specimens in ISO 12944.

腐蝕度類別	耐久性範圍	ISO 2812-1 耐化學性 h	ISO 2812-2 浸水試驗 h	ISO 6270 水冷凝試驗 h	ISO 7253) 鹽霧試驗
C4	低	--	--	120	240
	中	--	--	240	480
	高	--	--	480	720
C5-I	低	168	--	240	480
	中	168	--	480	720
	高	168	--	720	1440
C5M	低	--	--	240	480
	中	--	--	480	720
	高	--	--	720	1440
Im1	低	--	--	--	--
	中	--	2000	720	--
	高	--	3000	1440	--
Im2	低	--	--	--	--
	中	--	2000	--	720
	高	--	3000	--	1440
Im3	低	--	--	--	--
	中	--	2000	--	720
	高	--	3000	--	1440

表 5 ISO 20340 評估試驗方法與時間。

Table 5 Test methods and times of coated specimens in ISO 20340.

試驗項目	大氣帶	飛沫帶、潮間帶	水下帶
老化試驗ISO 20340 Ageing Resist.	4200 h	4200 h	
陰極解離ISO 15711 Cathodic Disbonding		4200 h	4200 h
海水浸泡ISO 2812-2 Sea Water Immersion		4200 h	4200 h

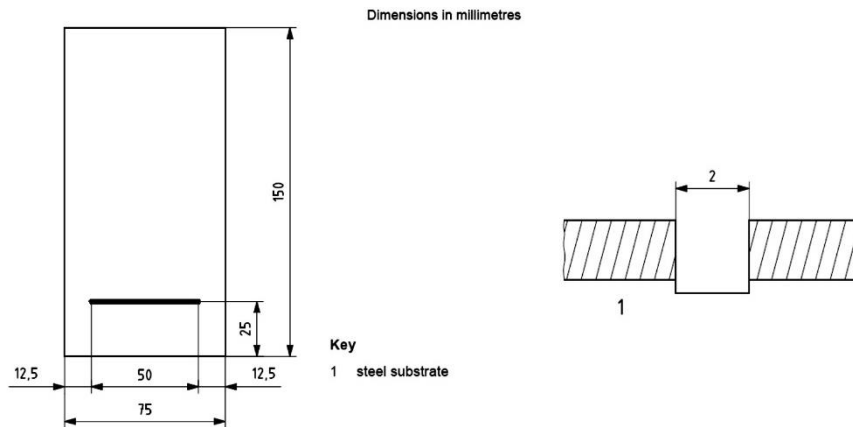


圖 1. 老化與海水浸泡試驗的試片準備。

Figure 1 Specimens preparation for ageing and sea water immersion test.

- c. 老化試驗(周循環)試驗，A 程序：QUV(3 天)+SST(3 天)+冷凍-20°C(1 天)。QUV 為 UVA340nm(0.89W/m²·nm) 60±3°C，4h+ 水冷凝 50±3°C，4h，試驗 25 周循環(4200h) 鹽霧試驗為 35°C，5%NaCl，如果無冷凍設備，可用恆濕試驗(23±2°C 50±5RH)替代，稱為 B 程序。

B. 陰極剝離試驗(Cathodic disbonding)

- a. 試片準備：試片二平面中心鑽一個 Ø3.18mm 可見底材的小孔(圖 2)。
- b. 刮痕周圍腐蝕的評估：12 周浸漬後清洗試片，去除鬆散塗膜(在 8h 內做完)。從小孔到試片的試片四個角的對角線方向，量測小孔周遭塗膜剝離的平均距離(mm)。放射狀解離(Radial disbondment)=(平均解離距離 -

3.18mm)/2，如塗膜有起泡、龜裂、剝離等缺陷，應一併說明。

- c. 試驗條件：試片曝露在試驗槽中，接上陰極保護電路(圖 3) 試驗溶液用人工海水，空氣攪拌溢流循環，流量最小 3 天一容積轉換，如溶液出現混濁、變色，

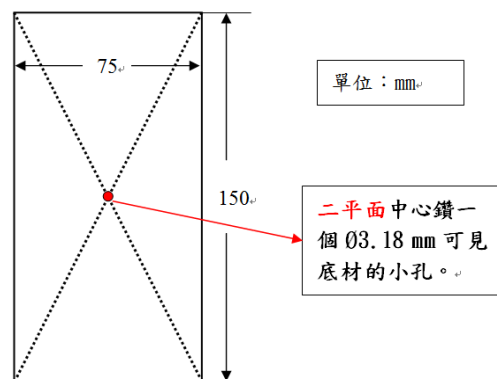


圖 2 陰極剝離試驗的試片準備。

Figure 2 Specimens preparation for cathodic disbonding test.

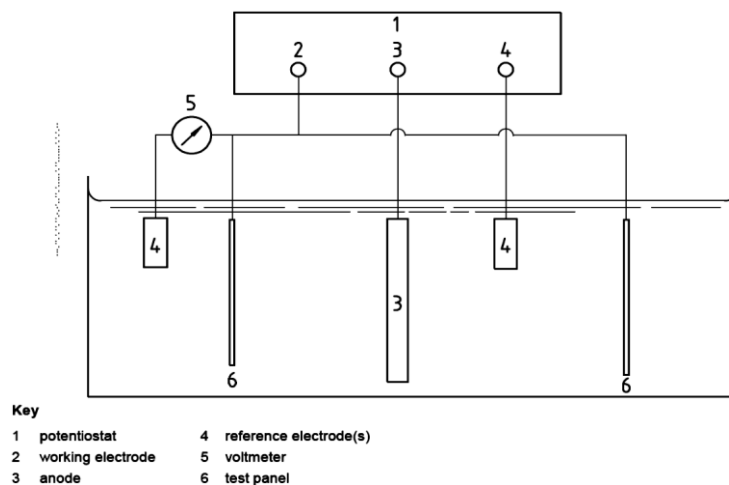


圖 3 陰極剝離試驗的陰極保護電路圖。
Figure 3 Circuit diagram of cathodic disbonding test.

應即更新溶液， $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 。陽極為石墨棒（長 $> 20\text{mm}$ ， $\text{Ø}10\text{mm}$ ），參考電極為飽和甘汞電極，陰極保護電路使試片維持在 $-1050 \pm 5\text{mv}$ （對飽和甘汞電極），試片為全浸入式，試驗面平行水流方向。試驗 25 周(4200 h)。

C. 海水浸泡試驗(Sea water immersion)

- a. 試片準備：同老化試驗(圖 1)。
- b. 刮痕周圍腐蝕的評估：同老化試驗。
- c. 試驗條件：試片曝露在試驗槽中，向垂直傾斜 $15 \sim 20^\circ$ ，試驗面平行水流方向，試片為全浸入式，試驗溶液用人工海水，空氣攪拌溢流循環，如溶液出現混濁、變色，應即更新溶液， $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 。試驗 25 周(4200 h)。

3. 結果與討論

3.1 大氣環境(C5M)之塗裝系統性能測試與評估

試驗類別與時間依照 ISO 12944 與 Norsok M501，如表 4、5。在 ISO 12944 標準中，未提及塗膜是否要有刮劃，但 Norsok M501 的老化試驗中是有刮劃的要求，為了比對方便，試片統一做

刮劃。舊版的 Norsok M501 的老化試驗中，有垂直刮劃與水平刮劃二種，新版只有水平刮劃，為了比對方便，試片統一做垂直刮劃與水平刮劃。

ISO 12944 水冷凝濕-濕循環試驗結果如圖 4，720 小時試驗後皆顯示塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣，塗膜皆無剝離。試驗結果顯示水冷凝濕-濕循環試驗的腐蝕性不大，三 C5M 塗裝系統皆具有很好的耐濕-濕循環特性。

ISO 12944 鹽水噴霧試驗結果如圖 5，1440 小時試驗後皆顯示塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣，塗膜皆無剝離，僅在刮劃線內有底材紅/白銹水垂流。試驗結果顯示柏林 C5M 塗裝的耐蝕性佳，可符合 ISO 12944 的耐鹽水噴霧特性要求。以 1 小時的鹽水噴霧約或等於 5 天海上大氣環境的曝露量換算，1440 小時的鹽水噴霧時間，或等於 20 年海上大氣環境的曝露量。

為了呼應台電提升塗裝品質要求，延長鹽水噴霧試驗時間至 2880 h，相當於 40 年海上大氣環境的曝露量的試驗，防蝕塗裝塗膜特性表現如圖 6。B11 塗膜，垂直剝離 M(mm)垂直 3.7 mm，水平 4.6 mm；B12 塗膜，垂直剝離 M(mm)垂直 2.4 mm，水平 2.7 mm；B13 塗膜，垂直剝離 M(mm)

離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估

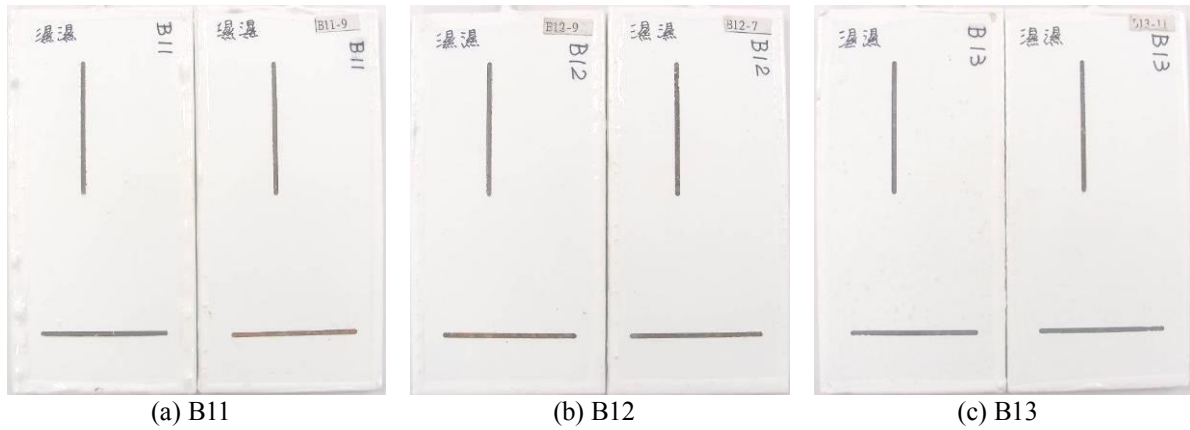


圖 4 ISO 12944 濕/濕循環試驗結果。
Figure 4 The appearance of specimens after ISO 12944 wetting cycling test.

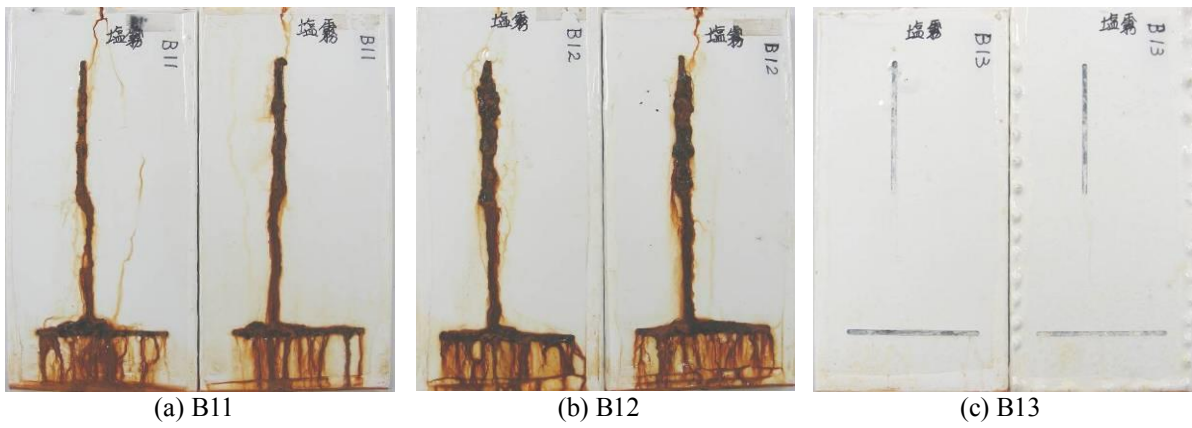


圖 5 1440 h 鹽霧試驗的結果。
Figure 5 The appearance of specimens after 1440 hours salt spray test.

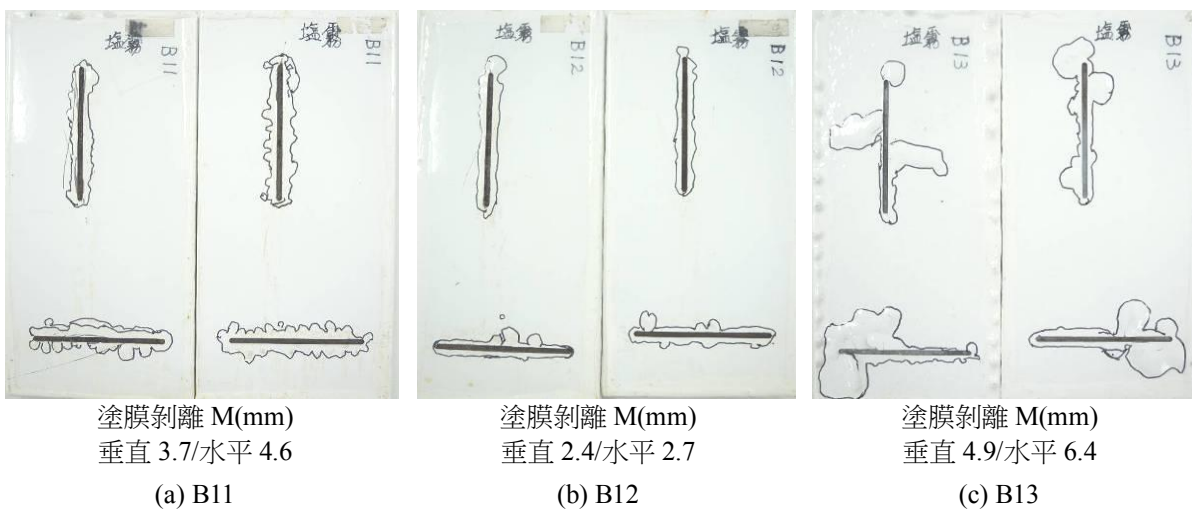


圖 6 2880 h 鹽霧試驗的結果。
Figure 6 The appearance of specimens after 2880 hours salt spray test.

垂直 4.9 mm，水平 6.4 mm。B12 塗膜的耐鹽霧性好，鹽霧試驗 2880 h，水平塗膜剝離 M(mm) 小於 3。此部分已超出 ISO 12944 的範圍，試驗結果可滿足 40 年的預期推想。

Norsok M501 之 C5M 塗裝老化試驗結果如圖 7、8，依據 Norsok M501，老化試驗 4200 h 結果顯示，B11、B12、B13 皆顯示塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣塗膜有剝離與起泡，垂直刮劃的塗膜剝離大於水平刮劃。量測結果顯示，B11，A 程序：塗膜垂直剝離塗膜剝離 M(mm) 垂直 4.4

mm，水平 4.5 mm；B 程序：垂直 4.3 mm，水平 4.2 mm。B12，A 程序：塗膜垂直剝離塗膜剝離 M(mm) 垂直 12.3 mm，水平 16.4 mm；B 程序：垂直 10.3 mm，水平 12.7 mm。B13，A 程序：塗膜垂直剝離塗膜剝離 M(mm) 垂直 4.2 mm，水平 0 mm；B 程序：垂直 3.9 mm，水平 1.9 mm。B12 無富鋅底漆的表現較差，B11 有塗富鋅底漆的較好，在及格邊緣；B13 鋅鋁熔射作底漆的最好，可符合 Norsok M501 規範 C5M 要求。

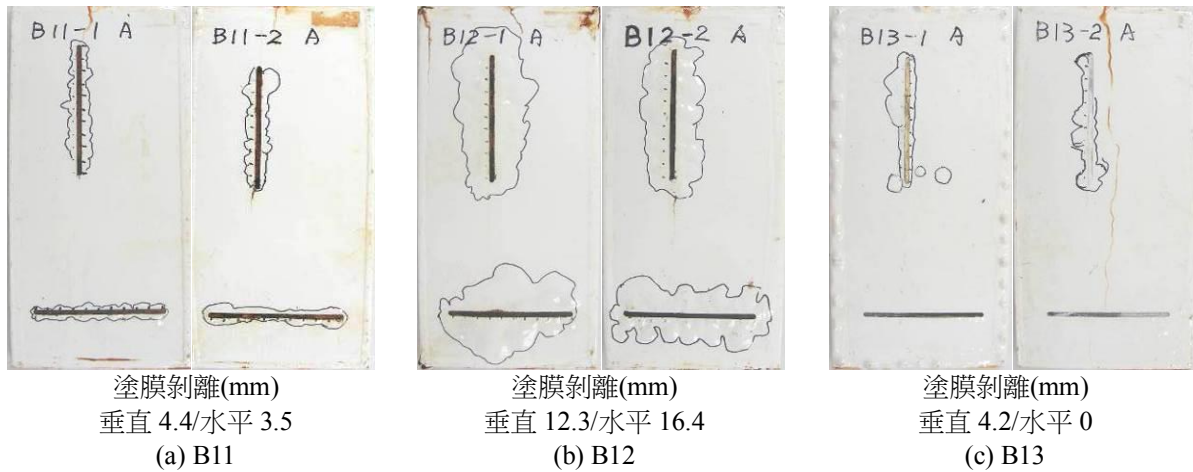


圖 7 A 程序老化試驗的結果。
Figure 7 The appearance of specimens after A procedure aging test.

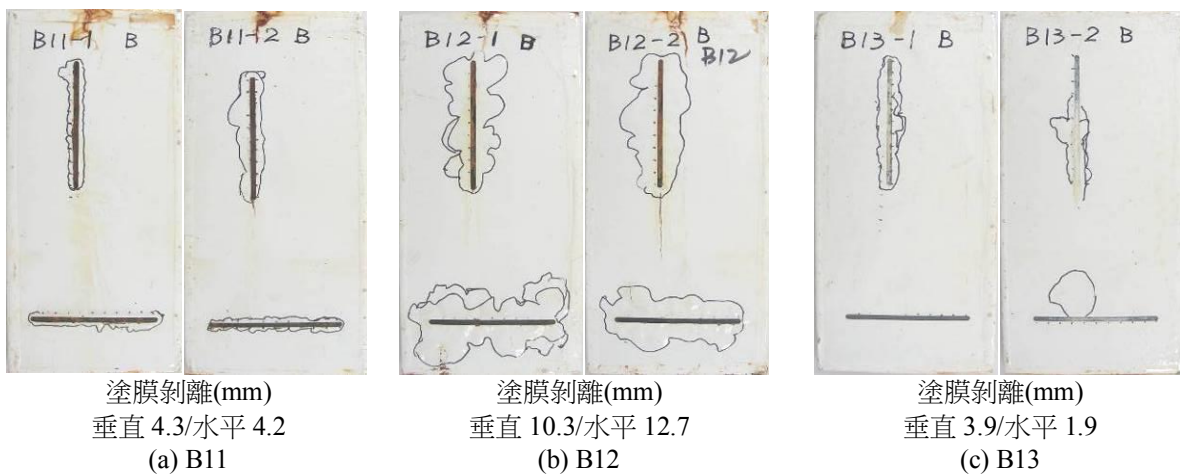


圖 8 B 程序老化試驗的結果。
Figure 8 The appearance of specimens after B procedure aging test.

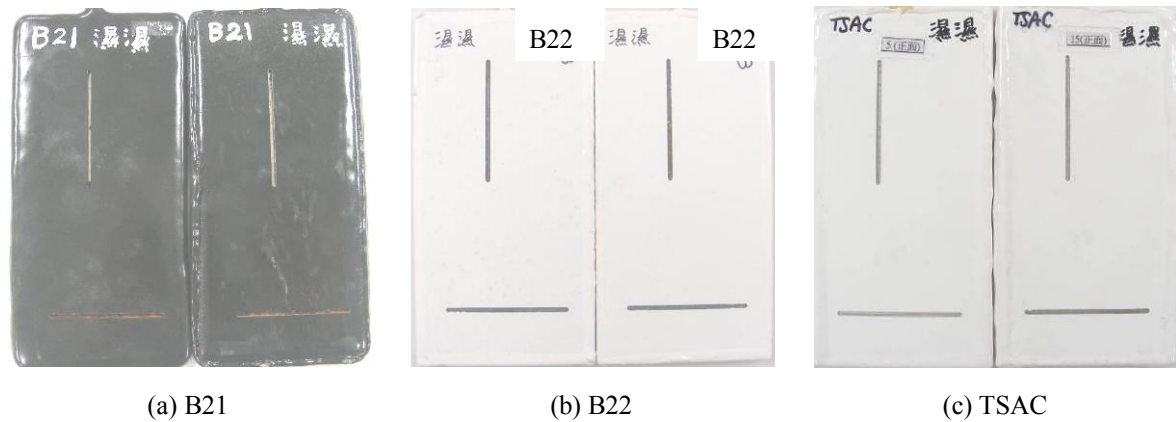


圖 9 ISO 12944 濕/濕循環試驗結果。

Figure 9 The appearance of specimens after ISO 12944 wetting cycling test.

3.2 飛沫帶/潮間帶/水下帶(C5M+Im2) 之塗裝系統性能測試與評估

ISO 12944 水冷凝濕-濕循環試驗結果如圖 9，720 小時試驗後塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣，塗膜皆無剝離。試驗結果顯示水冷凝濕-濕循環試驗的腐蝕性不大，二塗裝系統皆具有很好的耐濕-濕循環特性。

ISO 12944 塗裝的鹽水噴霧試驗結果如圖 10，1440 小時試驗後塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣，塗膜皆無剝離，僅在刮劃線內有底材紅/白銹水垂流。以 1 小時的鹽水噴霧約或等於 5 天海上大氣環境的曝露量換算，1440 小時的鹽水噴霧時間，或等於 20 年海上大氣環境的曝露量。

為了呼應台電提升塗裝品質要求，延長鹽水噴霧試驗時間至 2880 h，相當於 40 年海上大氣環境的曝露量的試驗，防蝕塗裝塗膜特性表現如圖 11。B21 塗膜，垂直剝離 2.0 mm，水平 0 mm；B22 塗膜，垂直剝離 3.2 mm，水平 8.0 mm。B21 耐蝕塗膜的耐鹽霧性好，鹽霧試驗 2880 h，垂直、水平塗膜剝離皆 < 3mm；B22 的鋅(85)鋁(15)熔射的耐蝕設計，可能因為常濕的鹽霧環境，鋅鋁合金溶解較快，導致它上面的塗膜反而剝離較大，

但它的銹水顏色是白色的，腐蝕應只在鋅鋁熔射層。TSAC 塗膜的垂直剝離與水平剝離分別 4.0 mm，2.0 mm，二片試片塗膜的耐鹽霧性表現差異很大，可能是塗裝上的因素，鋁熔射與塗裝分別由不同廠商來做，工序不連貫，熔射後的表面已受汙染。或可能因為常濕的鹽霧環境，鋁在氯離子的環境中無法建立鈍化態，溶解較快，導致它上面的塗膜反而剝離較大，但它的銹水顏色是白色的，腐蝕應只在鋁熔射層。鹽霧試驗 2880 h 已超出 ISO 12944 的範圍的實踐案例，但可推測遭遇為 40 年曝露量的預期試驗結果。

ISO 12944 離岸風機塗裝的純水浸泡試驗結果如圖 12，3000 小時試驗後塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣，塗膜皆無剝離，僅在刮劃線內有底材紅/白銹水垂流。上述試驗結果顯示該塗裝的耐蝕性佳，可符合 ISO 12944 的塗膜特性要求。

Norsok M501 之 Im2 塗裝老化試驗 4200 h 的結果如圖 13、14，B21、B22 皆顯示塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣塗膜有剝離與起泡，垂直刮劃的塗膜剝離大於水平刮劃。量測結果顯示，B21 A 程序 塗膜垂直剝離 10.1mm 水平 3.9mm；

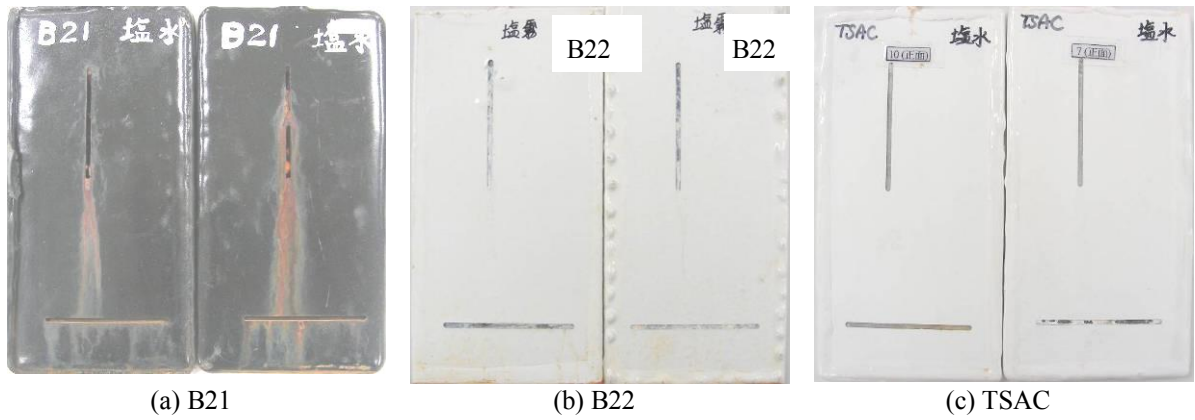


圖 10 1440 h 鹽霧試驗的結果。

Figure 10 The appearance of specimens after 1440 hours salt spray test.

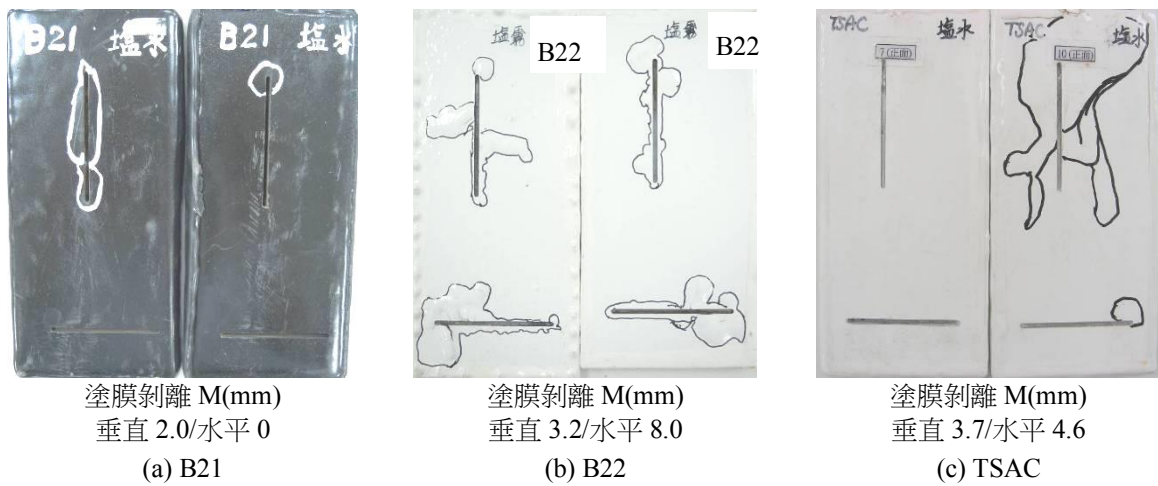


圖 11 2880 h 鹽霧試驗的結果。

Figure 11 The appearance of specimens after 2880 hours salt spray test.

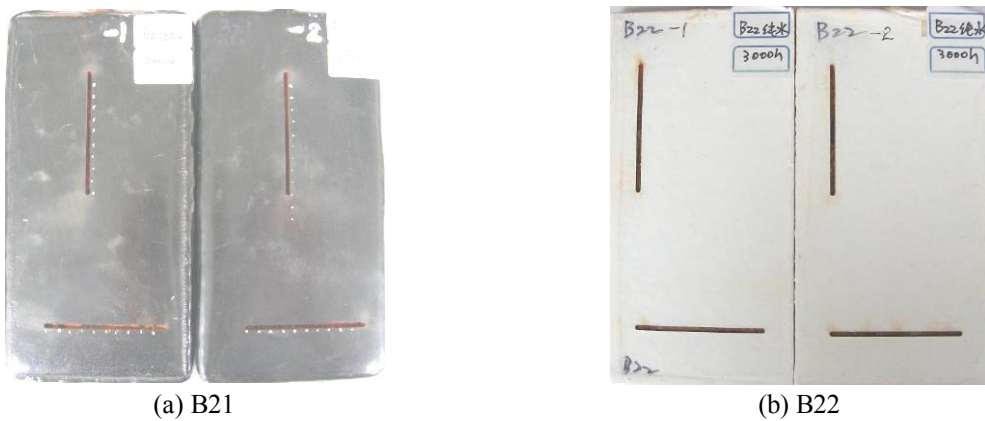


圖 12 純水浸泡試驗的結果。

Figure 12 The appearance of specimens after pure water immersion test.

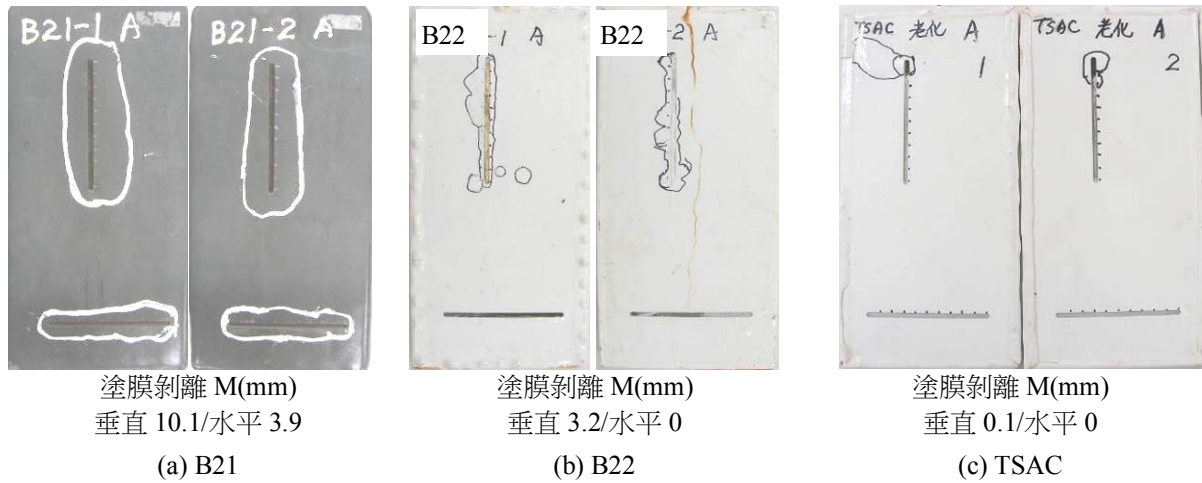


圖 13 A 程序老化試驗的結果。
Figure 13 The appearance of specimens after A procedure aging test.

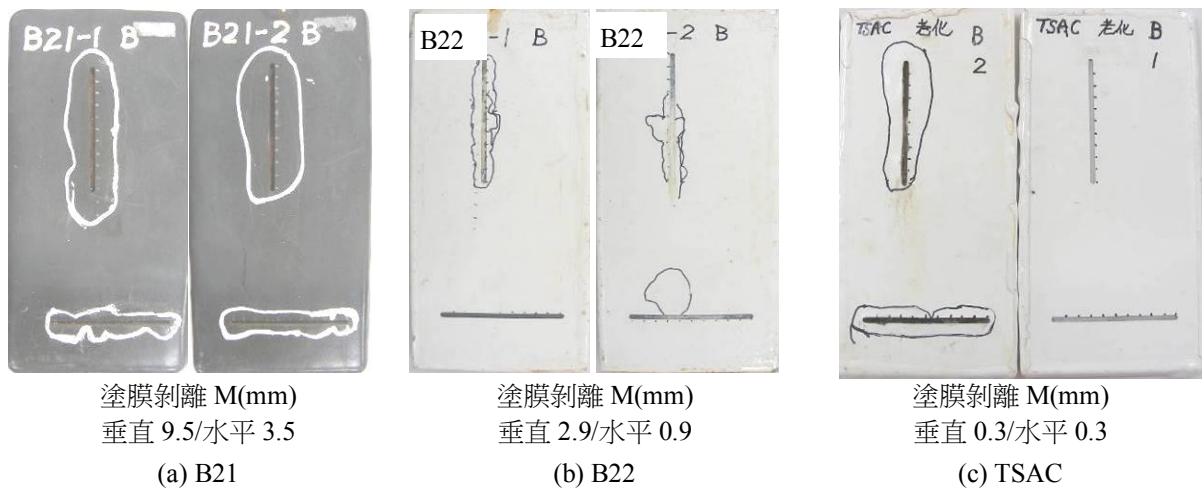


圖 14 B 程序老化試驗的結果。
Figure 14 The appearance of specimens after B procedure aging test.

B 程序：垂直 9.5mm，水平 3.5 mm。B22，A 程序：塗膜垂直剝離 3.2 mm，水平 0 mm；B 程序：垂直 2.9 mm，水平 0.9 mm。依據 Norsok M501 的標準，4200 小時試驗後水平塗膜剝離需 < 3 mm，B22 鋅鋁熔射的最好，可符合 Norsok M501 規範 Im2 要求。TSAC 塗膜無異狀，垂直刮劃與水平刮劃邊緣塗膜有剝離與起泡。量測結果顯示，A 程序塗膜垂直剝離：0.1 mm，水平：0 mm；B 程序：垂直：0.3 mm，水平：0.3 mm。A 程序為 7 天的

循環試驗中，冷凍 1 天(-20℃)，B 程序為 7 天的循環試驗中，恆濕試驗(23±2℃，50±5%RH)1 天，A 的條件嚴於 B，因而塗膜剝離較大。台灣氣候濕熱，不像挪威、英國北歐寒冷，不至於到 -20℃ 天氣，但是冬天一樣海水冷，冷凍模擬試驗有其參考性。4200 h 老化試驗與 2880 h 鹽霧試驗結果不一致，老化試驗有乾、濕循環可能較接近大氣候型態，乾、濕循環對鋅鋁熔射層的溶解力較小，致鋅鋁熔射層上的塗膜剝離較小。

Norsok M501 之 Im2 塗裝的海水浸泡試驗 4200 h 結果如圖 15，B21 與 B22 塗裝的垂直、水平塗膜剝離皆為 0；顯示 B21 耐蝕底漆、B22 鋅鋁熔射與 TSAC 的塗裝系統皆有非常好的耐海水腐蝕特性。

裸鋼的陰極防蝕塗膜剝離試驗 4200 h 結果如圖 16，試驗後的裸鋼外觀呈現灰黑色，重量無損失；顯示陰極防蝕確實能保護鋼板免於腐蝕。

純粹是鋼板，它的保護電位只要 $< -770\text{mv}$ (對甘汞參考電極) 即可，而陰極防蝕塗膜剝離試驗施加的電位為 -1050mv ，對鋼板而言是在過保護狀態，無重量損失是可預期的。在過保護狀態下，會產生較多的氣體，如氫氣等，這些氣體會導致塗膜較易於剝離，這是本試驗要考驗在陰極防蝕的保護下，塗膜附著耐剝離的能力。圖 16 的結果是確認在有效的陰極防蝕狀況下，進行塗膜剝離試驗。

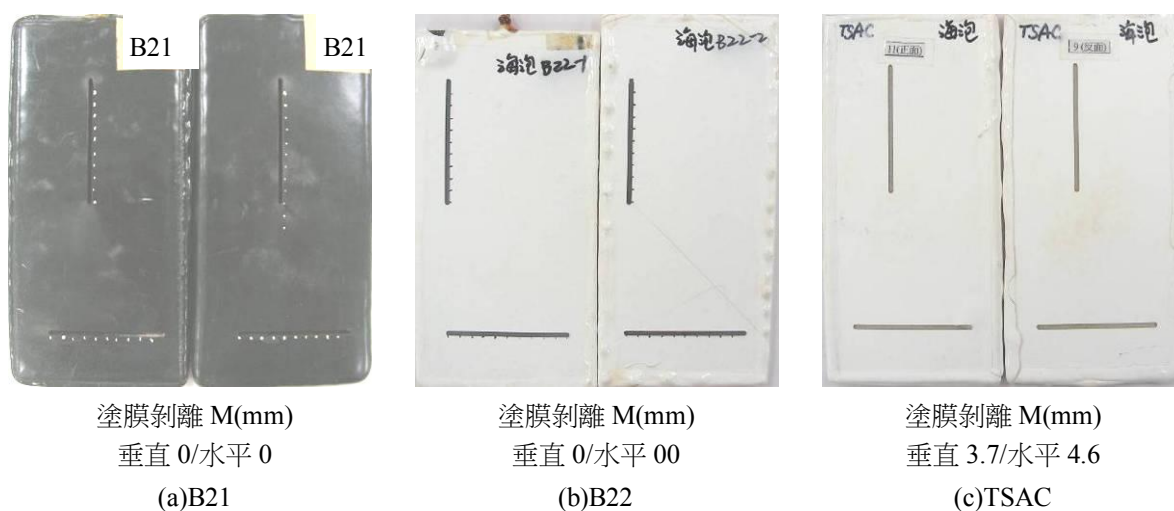


圖 15 海水浸泡試驗的結果。
Figure 15 The appearance of specimens after sea water immersion test.

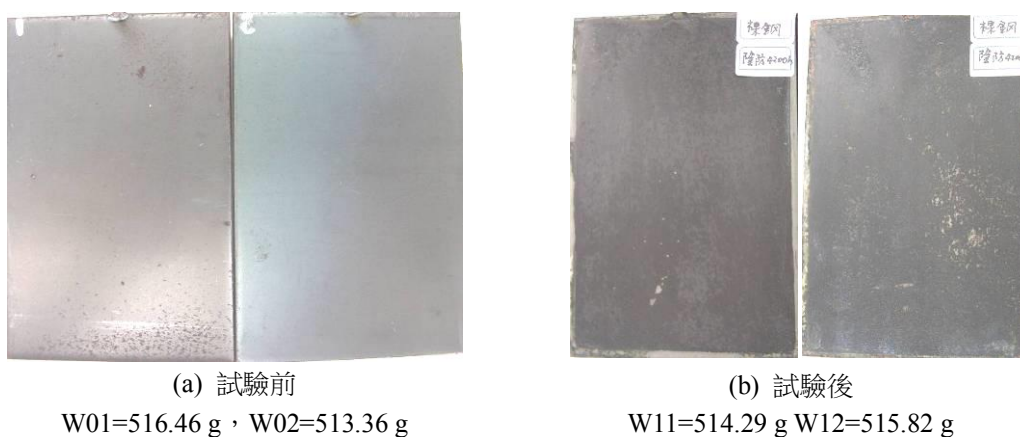


圖 16 裸鋼的陰極防蝕塗膜剝離試驗的結果。
Figure 16 The appearance of naked steel specimens after cathodic disbonding test.

Norsok M501 之 Im2 塗裝的陰極防蝕塗膜試驗 4200 h 結果如圖 17，B21 小孔周遭塗膜剝離的平均距離為 0 mm；B22 小孔周遭塗膜剝離的平均距離為 29 mm；顯示 B21 耐蝕底漆的塗裝系統有非常好的耐陰極防蝕腐蝕特性，B22 則不然；可能是該陰極防蝕保護電位是針對鋼鐵的，而不是對鋅鋁熔射層的，鋅鋁較活潑，對曝露的鋅鋁熔射層保護不足，影響到塗膜附著的表現，但它的銹水是白色的，腐蝕應只在鋅鋁熔射層。TSAC 塗裝的小孔周遭塗膜剝離龜裂。可能是該陰極防蝕保護電位是針對鋼鐵的，而不是對鋁熔射層的，鋁在海水中無法形成鈍化層，對曝露的鋁熔射層

保護不足，影響到塗膜附著的表現，但它的銹水是白色的，腐蝕應只在鋁熔射層。

綜合的評量結果如表 6、7，各塗裝系統皆可符合 ISO 12944 的要求，如要呼應台電提升塗裝品質要求，延長鹽水噴霧試驗時間至 2880 h，相當於 40 年海上大氣環境的曝露量的試驗，以耐蝕底漆高膜厚塗裝的 B21 為佳，鋅粉底漆塗裝系統的 B11 次之，鋅鋁與鋁熔射塗裝系統，可能因為常濕的鹽霧環境，熔射金屬層在氯離子的環境中無法建立鈍化態，溶解較快，導致它上面的塗膜反而剝離較大，但它的銹水顏色是白色的，腐蝕應只在熔射層。

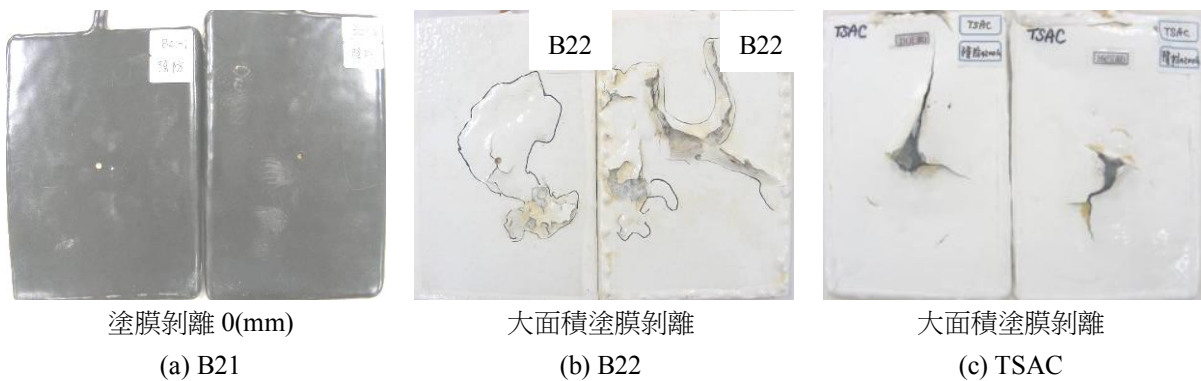


圖 17 陰極防蝕塗膜剝離試驗的結果。
Figure 17 The appearance of specimens after cathodic disbonding test.

表 6 C5M 耐久性試驗後塗膜的剝離距離值 M(mm)。
Table 6 Film creep(mm) after C5M durability test.

試驗別 塗裝別	Norsok M501 老化試驗 4200 h				鹽水噴霧試驗 2880 h	
	A 程序(冷凍-20 °C)		B 程序(常溫恆濕)		垂直刮劃	水平刮劃
	垂直刮劃	水平刮劃	垂直刮劃	水平刮劃		
B11	4.4	3.5	4.3	4.2	3.7	4.6
B12	12.3	16.4	10.3	12.7	2.4	2.7
B13	4.2	0	3.9	1.9	4.9	6.4
B21	10.1	3.9	9.5	3.5	2.0	0
B22	3.2	0	2.9	0.9	3.2	8.0
TASC	0.1	0	0.3	0.2	4	2

表 7 (C5M+Im2)耐久試驗後塗膜的剝離距離值 M(mm)。

Table 7 Film creep(mm) after C5M and Im2 durability test.

試驗別 塗裝別	Norsok M501 水下試驗 4200 h			純水浸泡 3000 h	
	陰極防蝕	海水浸泡		垂直刮劃	水平刮劃
		垂直刮劃	水平刮劃		
柏林 B21	0	0	0	0	0
柏林 B22	大面積剝離	0	0	0	0
TASC	大面積剝離	0	0	--	--

眾多的試片中，僅 B22 與 TSAC 塗裝系統可符合 Norsok M501 老化試驗 4200 h 的要求，B21 同時符合 Norsok M501 海水浸泡、陰極防蝕塗膜試驗。鋅鋁與鋁熔射金屬層可能是該陰極防蝕保護電位是針對鋼鐵的，而不是對鋅鋁/鋁熔射層的，鋅、鋁較活潑，對曝露的鋅鋁/鋁熔射層保護不足，影響到陰極防蝕塗膜塗膜附著的表現。

4. 結論

看好政府推動的「千架海陸風力機」市場，本研究進行離岸風機之大氣環境(C5M)與水下環境(飛沫帶/潮間帶/水下帶(C5M+Im2))塗裝系統性能之測試與評估，並評估使用年限可達 40 以上的塗膜性能測試結果。

本研究塗裝試片底漆為富鋅底漆、鋅鋁與鋁熔射、環氧樹脂防蝕漆等塗裝系統。依據 ISO 12944、NORSOK M501 的試驗方法進行測試。研究結果顯示：各塗裝系統皆可符合 ISO 12944 的要求，如要呼應台電相當於 40 年海上大氣環境的曝露量的試驗，以耐蝕底漆高膜厚塗裝的為佳，鋅粉底漆塗裝系統次之，鋅鋁與鋁熔射塗裝系統，可能因為常濕的鹽霧環境，熔射金屬層在氯離子的環境中無法建立鈍化態，溶解較快，導致它上

面的塗膜反而剝離較大，但它的銹水顏色是白色的，腐蝕應只在熔射層。鋅鋁與鋁熔射塗裝系統可符合 Norsok M501 老化試驗的要求，耐蝕底漆高膜厚塗裝同時符合 Norsok M501 海水浸泡、陰極防蝕塗膜試驗。鋅鋁與鋁熔射金屬層可能是該陰極防蝕保護電位是針對鋼鐵的，而不是對鋅鋁/鋁熔射層的，鋅、鋁較活潑，對曝露的鋅鋁/鋁熔射層保護不足，影響到陰極防蝕塗膜塗膜附著的表現。

參考文獻

- [1] ISO 12944: Paints & Varnishes - Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems, 1998.
- [2] NORSOK M501: Surface Preparation and Protective Coating, 1999.
- [3] NACE SP0108: Corrosion Control of Offshore Structures by Protective Coatings, 2008.
- [4] ISO 20340: Paints and varnishes – Performance Requirements for Protective Paint Systems for Offshore and Related Structures, 2009.