

離岸風機水下基礎塗裝耐蝕性及耐海水沖蝕性研究 Study on corrosion resistance of offshore wind turbine underwater foundation coating and seawater corrosion resistance

詹子寬¹、樊耀鴻¹、吳宗峯²、吳興練²、李弘彬*¹

Zi-Kuan Zhan¹, Yao-Hung Fan¹, Zong-Feng Wu², Xing-Lian Wu², Hung-Bin Lee*¹

中文摘要

本研究是探討台灣海洋環境對離岸風機水下基礎塗裝耐蝕性及耐海水沖蝕性研究，以無溶劑型環氧樹脂漆、熔射純鋁及鋅鋁和高速火焰熔射噴塗(HVOF)鐵基非晶質合金等，共 4 種材料進行測試。使用冷熱交變試驗機與沖蝕試驗機來模擬台灣氣候和海浪沖擊對離岸風機基礎塗層的影響，並配合海水吊掛實際測試，瞭解塗層在海上的附著性及耐沖蝕能力。研究結果顯示：環氧樹脂包覆的試片，在海水中不易侵蝕至試片內部；而在熔射純鋁及鋅鋁的試片，受到海水侵蝕後，表面會產生大量氧。在經過 11 次循環試驗下，2 種塗層皆有受到腐蝕，表面有孔洞及剝落情形；而 HVOF 試片，經過 2 次循環試驗產生嚴重腐蝕。

經過 6 個月海水吊掛試驗後，可以發現 4 種試片在海水飛濺區都無明顯變化。在潮差區有許多青苔附著於表面。而環氧樹脂包覆的試片能輕易去除青苔附著，熔射純鋁及鋅鋁試片則會有無法輕易去除的青苔附著。4 種試片在全浸區皆受到貝類及藻類附著，將試片清理後亦有藻類附著於表面，也有些輕微的腐蝕現象。

關鍵詞：離岸風機、純鋁、鋅鋁熔射、海水吊掛、耐腐蝕。

Abstract

This study explores the marine environment in Taiwan for corrosion and seawater resistance of underwater base coatings for offshore wind turbines. We use four kinds of coating to test: solvent-free epoxy resin paint,

收到日期：110 年 04 月 12 日

修訂日期：110 年 05 月 17 日

接受日期：110 年 06 月 24 日

¹ 國立臺灣海洋大學 光電與材料工程系

¹ Department of Optoelectronics and Materials Technology, National Taiwan Ocean University

² 中鋼公司 綠能與系統整合研究發展處 產品應用技術組

² Iron & Steel Research & Development Department, China Steel Corporation, Taiwan

*聯絡作者：lhb6018@mail.ntou.edu.tw

pure aluminum spraying, zinc-aluminum spraying and high velocity flame spraying (HVOF) iron-based amorphous alloys. Cold and hot alternating test machine and erosion testing machine were used to simulate the climate and wave impact on the foundation structure of offshore wind turbine in Taiwan and seawater suspension test was performed to understand the adhesion and corrosion resistance of the coating. The research results show that the epoxy resin-coated test piece was not easy to be corroded into the interior of the test piece in seawater.

However, the test pieces sprayed with pure aluminum and zinc-aluminum were eroded by seawater, a large amount of oxygen were generated on the surface. After 11 cycle tests, both coatings were corroded, with voids and peeling on the surface. The HVOF test piece was severely corroded after 2 cycle tests.

After six months of seawater suspension tests, it can be found that the four kinds of specimen in the seawater splash area have no obvious changes. In tidal areas, there is a lot of moss attached to the surface of each coating specimens coated with epoxy resin can easily remove moss attachments. The sprayed pure aluminum and zinc-aluminum specimens have moss that is not easy to be removed. Four specimens were adhered by shellfish and algae in the full immersion area. After cleaning, algae are still attached to the surface, and there is some slight corrosion.

Keywords: offshore wind turbines; pure aluminum; zinc-aluminum spraying; seawater suspension; corrosion resistant.

1. 前言

1.1 國內外臨海腐蝕防護技術現況與發展

台灣地處亞熱帶，氣溫高，日照強，四面環海，空氣中的相對濕度和鹽分含量很高。隨著經濟的不斷發展，海上風力發電機組、船舶運輸、海橋、航海設施等日益增多。一般海洋工程結構皆由金屬材料(尤其是鋼材)、鋼筋混凝土材料等製成。因此，近海水下環境對腐蝕性結構材料、海洋結構物的耐久性有很大影響^[1-3]。

在腐蝕控制的主要採用塗漆(簡稱塗層)是最重要的控制方法，其次是耐腐蝕材料，是表面處理和改質是常用的腐蝕控制方法，電化學保護(陽極犧牲和外加電流)是常用在控制海洋結構的腐蝕方法^[4,5]。另外結構健康監測檢測技術是確定腐蝕防護效果、掌握腐蝕動態，並提供多種腐蝕控制措施和安全評價的重要依據。因此，腐蝕安全評價和壽命評估決策是確保海洋工程設施和初始設計安全可靠的重要環節。

海洋防腐塗料的發展方向是以環保、節能、節約資源、高性能化和功能化。例如：(1)低表

面處理防銹漆，不僅可以降低表面處理壓力，避免前處理造成的環境污染，還可以節省大量維修費用；(2)開發具有無鉛、無鉻、無污染之高防銹性能的顏料和抗氧化填料；(3)無機水性之富鋅塗料被廣泛用作環保、無 VOC 的水性防腐塗料；(4)無溶劑塗料也是研究熱點，主要是無溶劑環氧塗料、無溶劑聚脲和聚氨酯塗料；(5)添加奈米粒子可改善塗層的流變性，提高塗層的附著力、塗膜硬度、光滑度和抗老化性能，成為另一種重要的發展方向之一；(6)超耐候性面漆：氟碳樹脂及含氟聚氨酯等改性材料是飾面基材的絕佳選擇。除塗漆船體外，還可用作接觸強腐蝕性介質的機艙內塗料。因此，高固體化、無溶劑(包括粉末塗料)或低溶劑、水性化、無重金屬、高性能、多功能、低表面、資源節約及智慧化等是國際塗料發展趨勢^[6-8]。

1.2 離岸風力發電機現況與發展發展

臺灣為海島國家，地勢狹長、多山。太陽能和陸上風力發電機有一些限制。不過臺灣海峽有良好的風場，足以發展海上風力發電機。根據

歐洲風能協會(EWEA)的數據，目前歐洲有 87 台海上風力發電機，主要分佈在英國和德國的北海，總產量 14 GW，占全球總市場的 90 %。英國是海上風電大國，也是世界上最大的海上風電場域^[9]。107 年 4 月，中鋼投資 34.21 億元新台幣，成立廠房及產業供應鏈聯盟「興達海洋基礎公司」。是台灣第一家海上風力渦輪機的海底基礎設施製造工廠。

臺灣地處亞熱帶，氣溫高日照強，且四面環海，空氣中的相對濕度和鹽分含量很高。受海水飛沫中所含氯化鈉顆粒的影響，離海 200 米以內的陸地環境腐蝕也屬於海洋環境腐蝕的範疇。如彰濱沿海太陽能機座、海上平台、海上風力發電機組和電廠受到的腐蝕問題。為了確保海上風力發電機組和太陽能電站工程服務的安全性和可靠性，減少重大災難性事故的發生，延長使用壽命具有重要意義。在海上風力發電機的高防腐要求，通常依據 ISO 12944-9、NORSOK M501、ISO 20340^[10-12]等規範規定之測試方法。

1.3 離岸風力發電機腐蝕環境與防腐措施

在離岸風力發電機的結構，可分為五個部分，每個部分對腐蝕防護都有不同的要求^[13,14]。

(1)海洋大氣區：海洋大氣包括機艙、葉輪和大部分塔架，其腐蝕特性：強紫外線、海洋大氣中的高濕度、晝夜溫差大，表面容易凝結；空氣中富含氯離子。在各種防腐措施中，複合塗層總膜厚至少 320 μm 。

(2)海水飛濺區：防腐一般包括塔底和部分地基，其腐蝕特點是：空氣乾濕膨脹交替，海水中富含氧氣，腐蝕最嚴重，碳鋼平均腐蝕速率：0.52 mm/年，常用的防腐措施與海洋大氣中相同，但對塗層厚度、材料和工藝要求更高。總膜

厚至少 600 μm 。

(3)潮差區：海水的周期性浸蝕、風浪沖擊和海中漂浮物的摩擦衝擊；碳鋼在海水中富氧腐蝕嚴重地區的平均腐蝕速率：0.29 mm/年。潮差一般考慮塗層保護，在平均低潮位以下，採用拼接塗層保護和陰極保護方案。與飛濺區的處理計劃相同，總膜厚至少為 600 μm 。

(4)全浸區：腐蝕介質主要是海水，腐蝕不如飛濺潮區。初始腐蝕速度較快，但隨後趨於穩定。碳鋼平均腐蝕速率：0.2 mm/年。可採用防腐方案 1：犧牲陽極加陰極保護法；防腐方案 2：犧牲陽極法陰極保護加塗料雙重保護，塗層配套參照潮差區，其總膜厚至少為 450 μm 。

(5)海泥帶：可能有硫酸鹽還原菌，受海底沉積物影響，腐蝕速率最低，碳鋼腐蝕速率：0.08 mm/年。海泥帶一般只採用塗層保護方案。

ISO 12944-9^[10]提出大氣腐蝕環境，可劃分為 6 個等級：C1 (非常低)；C2 (低)；C3 (中等)；C4 (高)；C5I (很高，工業環境)；C5M 與 CX (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；Im4 (海水 + CP(陰極防蝕))環境。離岸風力發電機的外表屬 C5M，浸水區域 Im2，內表面 C4。在離岸風力發電機與大氣環境接觸部分須符合 C5M 與 CX (很高，海洋環境)防蝕等級以上，基座須符合 Im2 防蝕等級以上^[11]。

我國位處亞熱帶地區，在海域上塔架表面巨大溫差及異材熱膨脹差異，造成保護層與塔架鋼材提早剝離，高鹽分水氣滲入導致塔架嚴重腐蝕與應力腐蝕。另外，洋流沖蝕甚至颱風引起海浪沖擊都將導致塗層剝落。因此，離岸用在防蝕技術需商用等級。

表 1 ISO12944-9 環境分類^[10]。
Table 1 Environment types of ISO 12944^[10].

Corrosion category	Loss of quality per unit area (After the first year of exposure)				Typical environment (for reference only)
	Low-carbon steel		Zinc		
	Weight loss $g\cdot m^{-2}$	Thickness loss μm	Weight loss $g\cdot m^{-2}$	Thickness loss μm	
C1 Very low	10	1.3	0.7	0.1	Heated buildings with clean air, such as offices, shops, schools, hotels, etc.
C2 Low	10 ~ 200	1.3 ~ 25	0.7 ~ 5	0.1 ~ 0.7	Low air pollution, mostly in rural areas
C3 Middle	200 ~ 400	25 ~ 50	5 ~ 15	0.7 ~ 2.1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution or low salinity coastal areas
C4 High	400 ~ 650	50 ~ 80	15 ~ 30	2.1 ~ 4.2	Industrial areas or coastal areas with high salinity
C5I Very high - Industry	650 ~ 1500	80 ~ 200	30 ~ 60	4.2 ~ 8.4	Industrial areas with high salinity and harsh atmosphere
C5M Very high - Ocean	650 ~ 1500	80 ~ 200	30 ~ 60	4.2 ~ 8.4	Coastal and offshore areas with high salinity
CX: extreme (Ocean)	1500 ~ 5500	200 ~ 700	60 ~ 180	8.4 ~ 25	Offshore areas with high salinity and industrial areas with extreme humidity and aggressive climate, subtropical and tropical atmospheres

2. 實驗方法

本研究是提供風機塔架塗佈作業之最佳化參數，以彰濱近海所做的相關調查與模擬，並使用複合式溫度交變腐蝕試驗機來探討含鹽環境下溫度交變對塗層所致劣化。另外，針對離岸風機之波浪與潮汐部分，甚至颱風引發強大海浪衝擊，用腐蝕沖蝕實驗機，來瞭解海浪浪擊對防蝕塗層的影響，並配合海水吊掛試驗進一步實際模擬海上環境，進行全面評估研究。

離岸風機水下基礎腐蝕分析及防治，首先選用指定系統之塗裝條件，經由 ISO 12944-9 與 NORSOK M501 所提議的風機塗裝系統，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，和底材的種類。

另外，彰濱近海無氣象局觀測站數據，因選取地理位置最接近的台中港海水溫度數據，2004 年到 2018 年最高溫在 31.7 °C，最低溫在 14.4 °C。因此，本實驗海水溫度設定在 30 °C 及 15 °C^[15]。

將 4 種指定塗料成為本研究的塗層，分別為無溶劑型環氧樹脂漆、熔射純鋁(300 μm)、熔射鋅鋁(300 μm)和鐵基非晶質合金進行高速火焰熔射噴塗(HVOF)等 4 種塗層方法進行測試，在使用環氧樹脂漆為面漆，純鋁、鋅鋁為底塗進行海水吊掛實驗(表 2)。

冷熱交變環境耐腐蝕試驗：首先紅外線照射 60 °C ~ 80 °C 時間 25 分鐘，轉換至海水噴霧

30 °C 時間 15 分鐘，進行環境溫度交變之腐蝕試驗。測試後，觀察塗層試片表面形貌變化。

沖蝕腐蝕試驗：以彰濱近海所做的相關調查條件進行模擬針對波浪與潮汐部分甚至颱風引發強大海浪沖擊，用於沖蝕腐蝕實驗。實驗調整試件與沖蝕水流角度 00、450 對試件進行沖蝕實驗，實驗條件：沖蝕速度：4 m/s，溫度 30 °C 為持續 2 天成為循環。測試後，觀察塗層試片表面

形貌變化。使用光學及掃描式電子顯微鏡，對熔射塗層顯微鏡結構進行觀察，並量測塗層厚度及分析其成份。

海水吊掛試驗：實際測試海上環境，以海水飛濺區、潮差區、全浸區三種不同區域，結果觀察塗層試片表面形貌變化。使用光學及掃描式電子顯微鏡，對熔射塗層顯微鏡結構進行觀察，並量測塗層厚度及分析其成份。

表 2 離岸風機飛濺區之塗裝系統。

Table 2 The coating system of the offshore wind turbines in the splash area.

年度	第二年度		
塗裝系統	A1	A2	A3
鋼鐵材料	平面：150 mm × 300 mm × 8 mm 圓管：外徑 Ø50.2 mm 8.5 mm × 500 mm 長 圓管：外徑 Ø20 mm × 500 mm 厚		
焊道	珠擊		
表面處理	Sa3，SM/RZ ≤ 3		
底塗	純鋁 300 μm	Zn 85 Al 15 300 μm	高速火焰熔射噴塗 (HVOF) 鐵基非晶合金 200 μm
塗層	環氧樹脂漆		

P.S 環氧樹脂漆(無/有)比較

3. 結果與討論

3.1 冷熱交變試驗

用(a)為熔射純鋁的試件用呈現銀白鋁合金顏色，在第 1 次循環結束後，塗層受到海水影響，金屬塗層表面出現淺灰黃色顏色變化，進行至第 7 次循環外觀都無明顯變化僅顏色加深(圖 1)。使用光學顯微鏡觀察(圖 2)，並比較初始試片與第 7 次循環，發現各角度都有明顯顏色變化，可能是氧化現象，可能是歸因於噴塗表面的部分氧化，進而有些為細小白斑產生。以掃描式電子顯微鏡觀察(圖 3)，可以發現未經測試試片橫截面厚度沒有明顯減少。經過 7 次腐蝕表面含有大量

的氧，且表面形成氧化鋁；氧元素不僅在氧化層，也會分布在整個鋁塗層內部，在第 9 次循環，透過光學顯微鏡觀察(圖 2)，發現試片表面已有些微腐蝕現象產生，且白斑分布更為廣泛，到第 11 次循環，透過光學顯微鏡觀察觀察表面，於焊接處已有裂縫產生，且試片表面有剝落情形。可推測試片已受到腐蝕，甚至滲透至內部，用掃描式電子顯微鏡觀察(圖 5)，試片厚度平均約減少 100 μm，可證明受到海水腐蝕影響。另外，成份分析顯示試片表面氧含量明顯增加，表示受到海水影響而氧化形成氧化鋁。

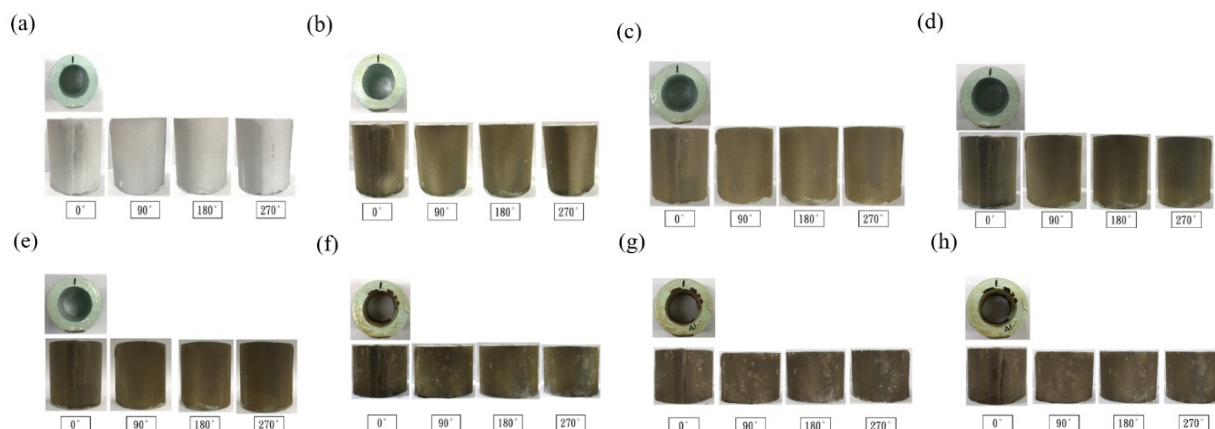


圖 1 純鋁塗料(a)初始試片，(b)第 1 次循環，(c)第 3 次循環，(d)第 5 次循環，(e)第 7 次循環，(f)第 9 次循環，(g)第 10 次循環，(h)第 11 次循環。

Figure 1 Pure aluminum coating (a) original specimen, (b) first cycle, (c) third cycle, (d) fifth cycle, (e) seventh cycle, (f) ninth cycle, (g) tenth cycle, (h) eleventh cycle.

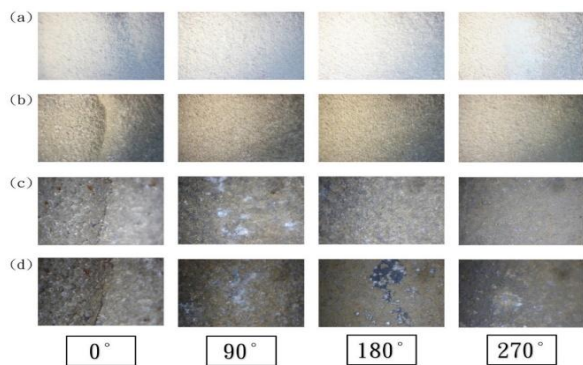


圖 2 純鋁塗料光學顯微鏡觀察(a)初始試片，(b)第 7 次循環，(c)第 9 次循環，(d)第 11 次循環。

Figure 2 OM image of pure aluminum coating (a) original specimen, (b) seventh cycle, (c) ninth cycle, (d) eleventh cycle.

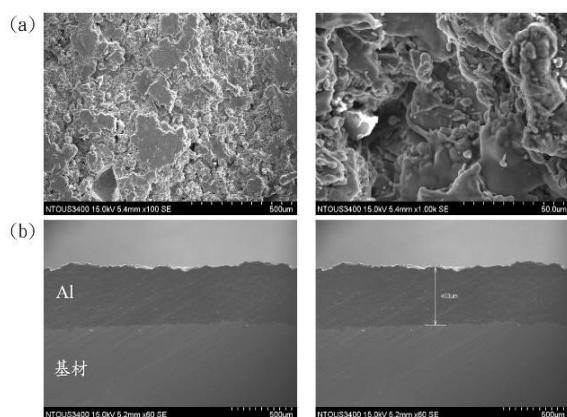


圖 3 純鋁塗料(初始)掃描試電子顯微鏡觀察 (a)正面，(b)橫截面。

Figure 3 SEM image of pure aluminum coating (origin) (a) surface, (b) cross section.

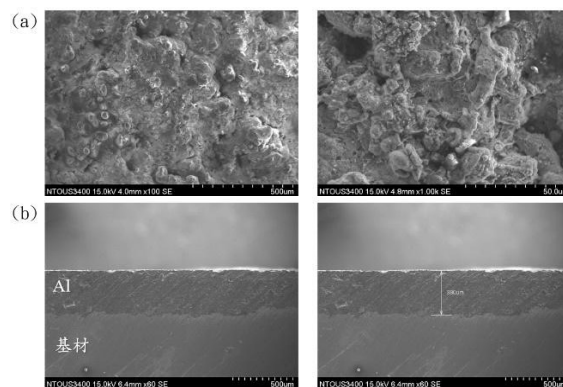


圖 4 純鋁塗料(第七次循環)掃描試電子顯微鏡觀察 (a)正面，(b)橫截面。

Figure 4 SEM image of pure aluminum coating (seventh cycle) (a) surface, (b) cross section.

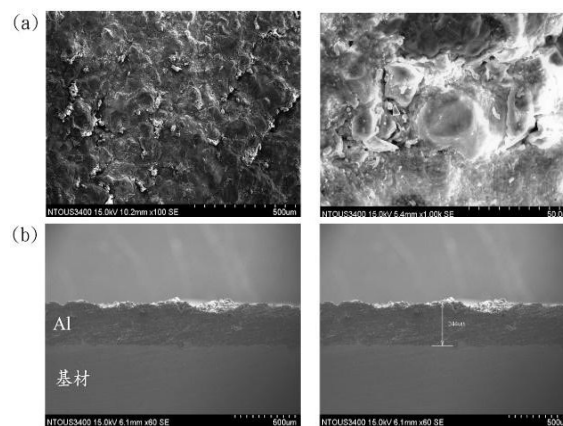


圖 5 純鋁塗料(第 11 次循環)掃描試電子顯微鏡觀察(a)正面，(b)橫截面。

Figure 5 SEM image of pure aluminum coating (eleventh cycle) (a) surface, (b) cross section.

鋅鋁塗料在第 1 次循環後，鋅鋁試片的塗層受到海水影響，失去金屬的光澤並顏色變暗。進行至第 5 次循環時，發現試片表面出現白色斑點(圖 6)，推測是鋅的選擇性沉澱^[16]，且在焊接處有些微繡水殘留；實驗持續至第 7 次循環，便使用光學顯微鏡觀察，並比較初始試件與第七次循環，發現白色斑點分佈在整個表面以及顏色變暗現象。這是歸因於鋅的選擇性沉澱。在掃描式顯微鏡觀察及成分分析(圖 7、8)，發現第 7 次循環後氧的含量也明顯增加，而鋅鋁含量則不變，推斷氧化已經滲透到塗層內部。塗層橫截面有些微

的裂縫，推測塗層內部有少許腐蝕現象；在進行至第 9 次循環後，透過光學顯微鏡觀察可發現白斑分布情況更為明顯(圖 9)，也有些微腐蝕的痕跡；進行至第 11 次循環，白色斑點分佈於整個試片表面，透過光學顯微鏡觀察，於焊接處發現腐蝕孔洞，另外試片 90°處有塗層剝落，而透過掃描式顯微鏡觀察(圖 10)，可發現試片噴塗不均勻 導致厚度不一，且表面容易受到腐蝕侵蝕而剝落。另外依照成份分析顯示，試片表面氧含量明顯增加，是由於試片受到海水氧化而導致。

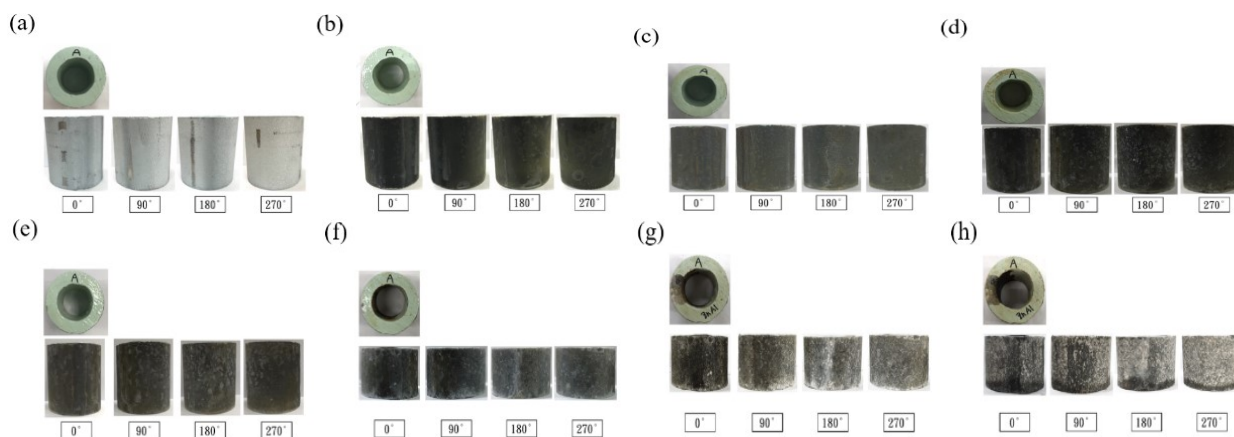


圖 6 鋅鋁塗料(a)初始試片，(b)第 1 次循環，(c)第 3 次循環，(d)第 5 次循環，(e)第 7 次循環，(f)第 9 次循環，(g)第 10 次循環，(h)第 11 次循環。

Figure 6 Zinc-aluminum coating (a) original specimen, (b) first cycle, (c) third cycle, (d) fifth cycle, (e) seventh cycle, (f) ninth cycle, (g) tenth cycle, (h) eleventh cycle.

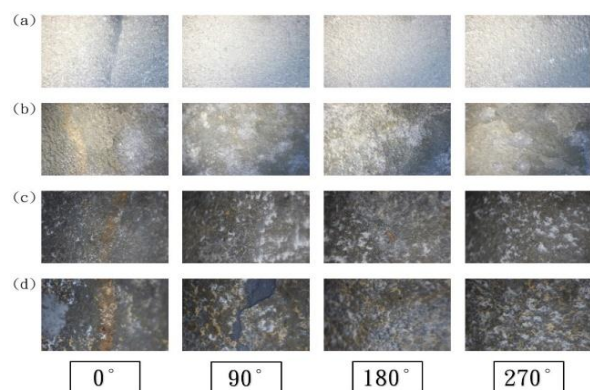


圖 7 鋅鋁塗料光學顯微鏡觀察(a)初始試片，(b)第 7 次循環，(c)第 9 次循環，(d)第 11 次循環。

Figure 7 OM image of zinc-aluminum coating (a) original specimen, (b) seventh cycle, (c) ninth cycle, (d) eleventh cycle.

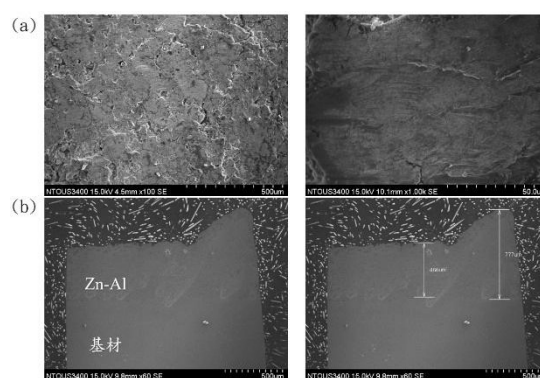


圖 8 鋅鋁塗料(初始)掃描式電子顯微鏡觀察 (a)正面，(b)橫截面。

Figure 8 SEM image of zinc-aluminum coating (origin) (a) surface, (b) cross section.

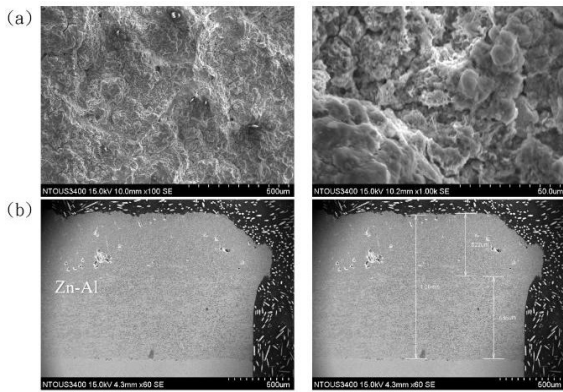


圖 9 鋅鋁塗料(第 7 次循環)掃描試電子顯微鏡觀察(a)正面, (b)橫截面。
Figure 9 SEM image of zinc-aluminum coating (seventh cycle) (a) surface, (b) cross section.

圓管 HVOF 試片在經過二次循環後, 可發現表面有明顯腐蝕現象, 且可觀察受到水流沖蝕的腐蝕痕跡(圖 11)。另外平板試片經過冷熱交變腐蝕循環二次後(圖 12), 試片受到紅外線照射以及海水噴灑, 可發現表面有腐蝕現象產生, 甚至產生孔洞, 推測試片內部也受到腐蝕。

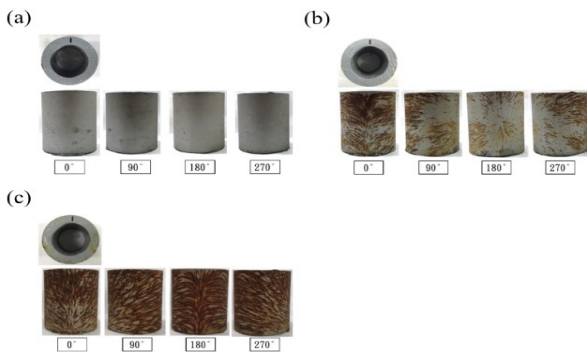


圖 11 HVOF 圓管試片(a)初始試片, (b)第一次循環, (c)第二次循環。
Figure 11 High velocity flame spraying (a) original specimen, (b) first cycle, (c) second cycle.

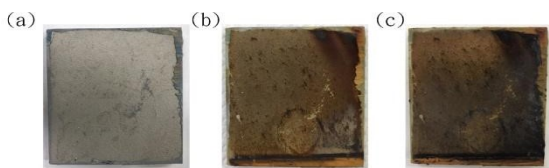


圖 12 HVOF 平板試片(a)初始試片, (b)第一次循環, (c)第二次循環。
Figure 12 High velocity flame spraying (a) original specimen, (b) first cycle, (c) second cycle.

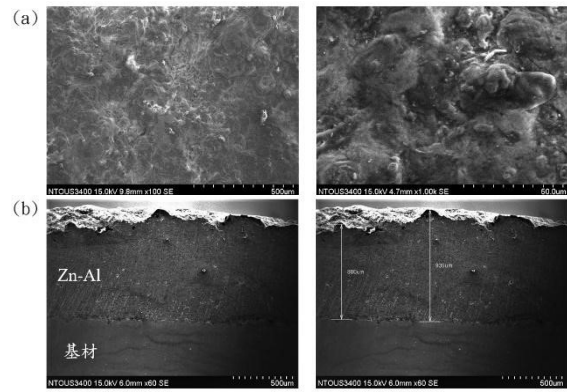


圖 10 鋅鋁塗料(第 11 次循環)掃描試電子顯微鏡觀察(a)正面, (b)橫截面。
Figure 10 SEM image of zinc-aluminum coating (eleventh cycle) (a) surface, (b) cross section.

環氧樹脂試片在第 1 次循環後(圖 13), 試片表面塗層由於受到環氧樹脂包覆, 無明顯改變, 而在進行至第五次循環後, 僅有試片表面顏色變化, 推測是受到海水侵蝕影響但無滲透至內部。

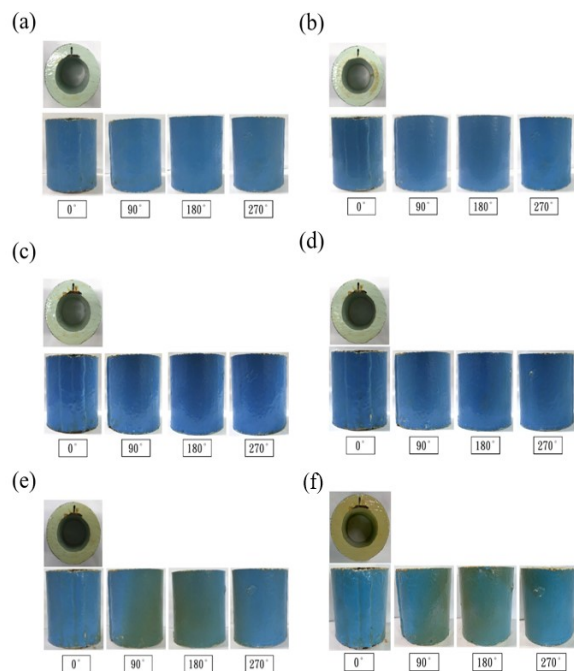


圖 13 環氧樹脂塗層(a)初始試片, (b)第一次循環, (c)第二次循環, (d)第三次循環, (e)第四次循環, (f)第五次循環。
Figure 13 Epoxy resin coating (a) original specimen, (b) first cycle, (c) second cycle, (d) third cycle, (e) fourth cycle, (f) fifth cycle.

3.2 海水吊掛試驗

經過六個月試驗後的環氧試片之飛濺區(圖 14-20)，透過光學顯微鏡觀察均無明顯腐蝕現象; 在潮差區表面則受到砂石及青苔附著，將其除去後，塗層表面呈現凹凸不平，推測表面已逐漸受

到海水侵蝕，但尚未侵蝕至內部;全浸區經過五個月試驗後，表面容易受到貝類及藻類附著，將其除去後，塗層表面有受到海水的侵蝕但無滲透至內部(圖 21-23)。

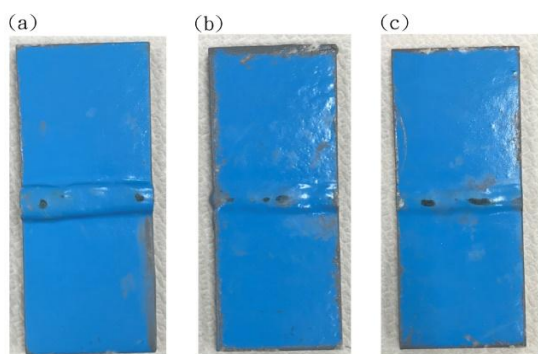


圖 14 初始試片(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 14 Original specimen (a) pure aluminum + epoxy, (b) zinc-aluminum + epoxy, (c) epoxy.

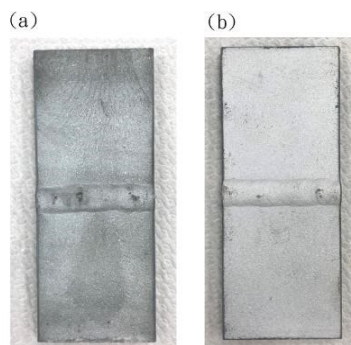


圖 15 初始試片(a)純鋁，(b)純鋁。
Figure 15 Original specimen (a) pure aluminum, (b) zinc-aluminum.

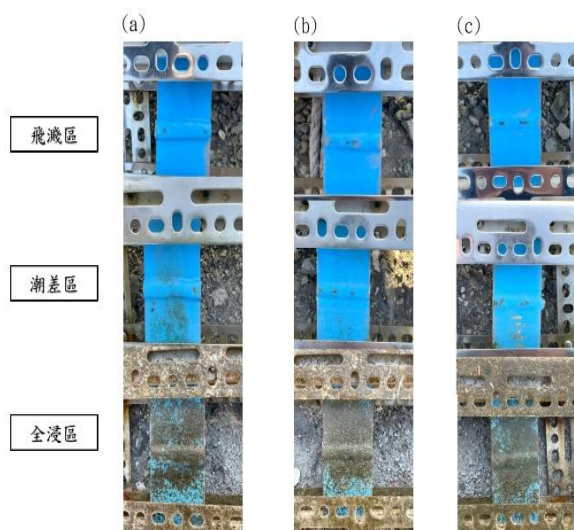


圖 16 試驗兩個月(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 16 Two month testing (a) pure aluminum + epoxy, (b) zinc-aluminum + epoxy, (c) epoxy.

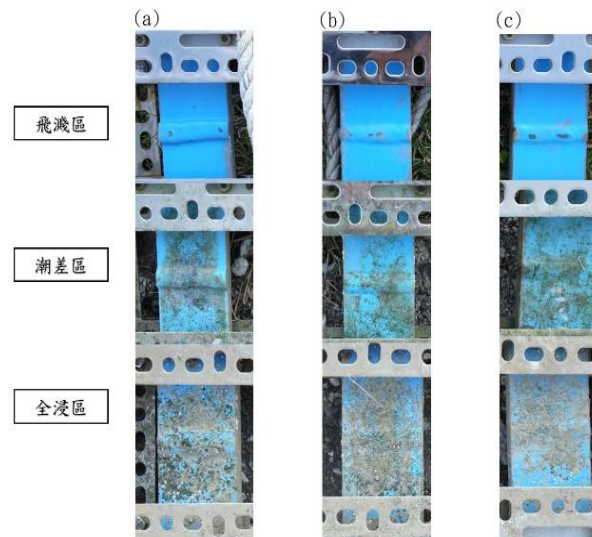


圖 17 試驗三個月(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 17 Three month testing (a) pure aluminum + epoxy, (b) zinc-aluminum + epoxy, (c) epoxy.

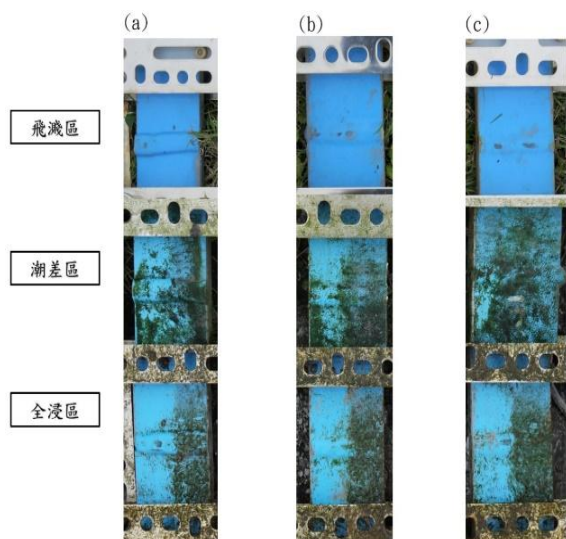


圖 18 試驗四個月(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 18 Four month testing (a) pure aluminum + epoxy, (b) zinc-aluminum + epoxy (c) epoxy.

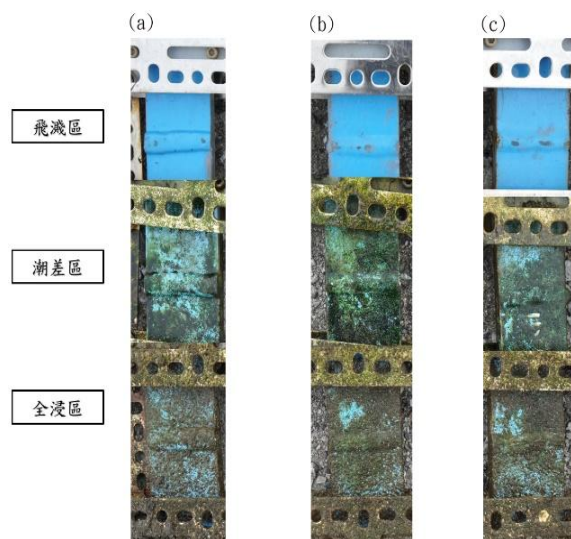


圖 19 試驗五個月(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 19 Five month testing (a) pure aluminum + epoxy, (b) zinc-aluminum + epoxy, (c) epoxy.

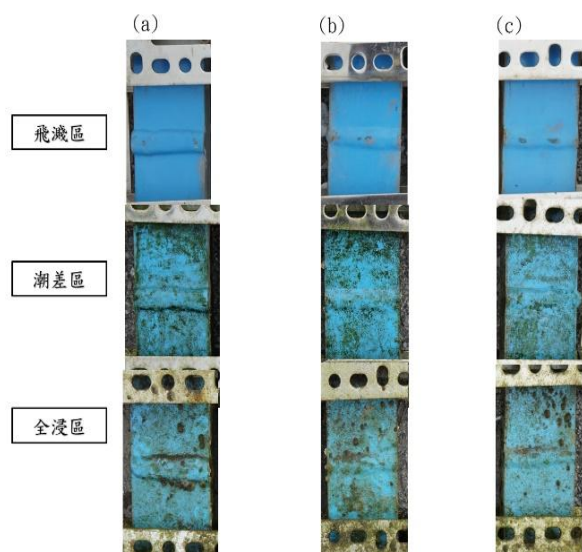


圖 20 試驗六個月(a)純鋁環氧，(b)鋅鋁環氧，(c)純環氧。
Figure 20 Six month testing (a) pure aluminum epoxy, (b) zinc-aluminum epoxy, (c) epoxy.

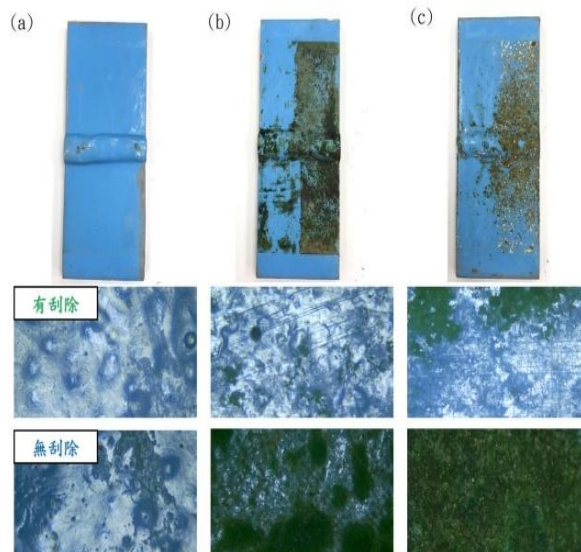


圖 21 鋅鋁環氧試片試驗五個月(a)飛濺區，(b)潮差區，(c)全浸區，光學顯微鏡觀察(有刮除及無刮除)。
Figure 21 OM image of the zinc-aluminum epoxy through five month testing (a) splash area, (b) tidal area, (c) full immersion area.

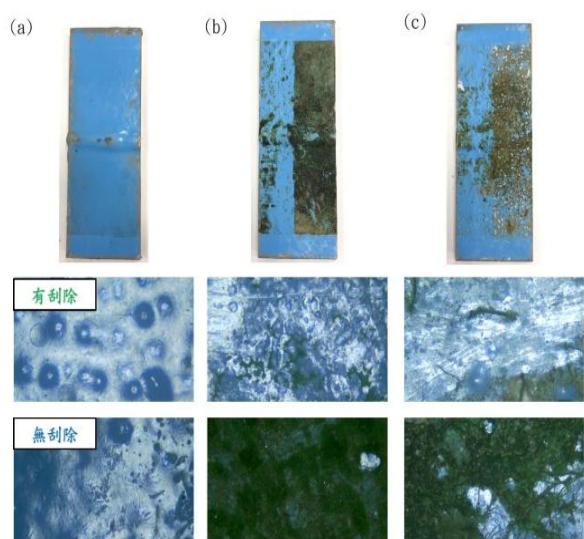


圖 22 純鋁環氧試片試驗五個月(a)飛濺區，(b)潮差區，(c)全浸區，光學顯微鏡觀察(有刮除及無刮除)。

Figure 22 OM image of the pure aluminum epoxy through five month testing (a) splash area, (b) tidal area, (c) full immersion area.

熔射鋅鋁及純鋁試片；在經過五個月試驗後(圖 24-28)，光學顯微鏡觀察試片，之飛濺區表面皆無明顯腐蝕現象。只有些微白色斑點產生；在潮差區試片表面則產生許多青苔附着，而試片

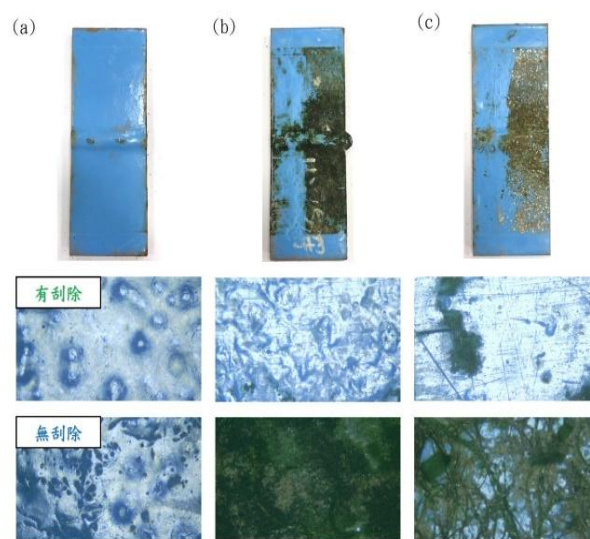


圖 23 純環氧試片試驗五個月(a)飛濺區，(b)潮差區，(c)全浸區，光學顯微鏡觀察(有刮除及無刮除)。

Figure 23 OM image of the epoxy through five month testing (a) splash area, (b) tidal area, (c) full immersion.

表面的附着物也無法輕易清除;在全浸區試片受到貝類與藻類附着(圖 29、30)；可以發現貝類幾乎遍布於試片表面，將試片清理後尚有許多貝類殘留於表面。

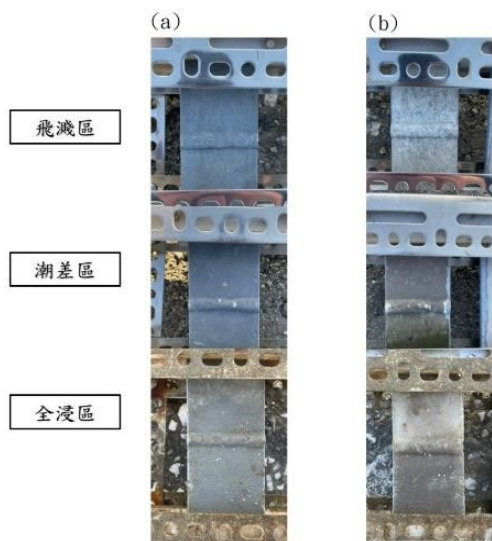


圖 24 試驗兩個月(a)鋅鋁，(b)純鋁。
Figure 24 Two month testing (a) pure aluminum, (b) zinc-aluminum.

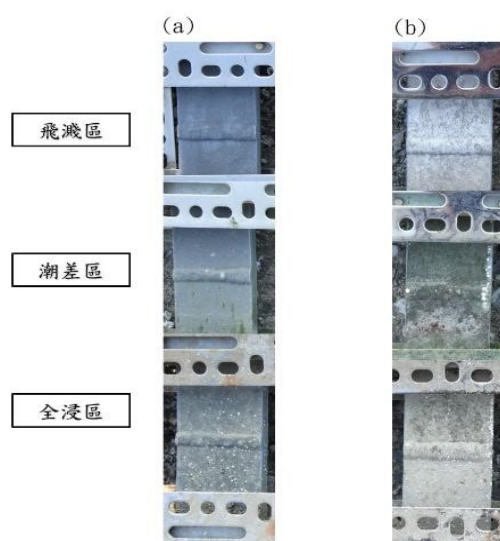


圖 25 試驗三個月(a)鋅鋁，(b)純鋁。
Figure 25 Three month testing (a) pure aluminum, (b) zinc-aluminum.

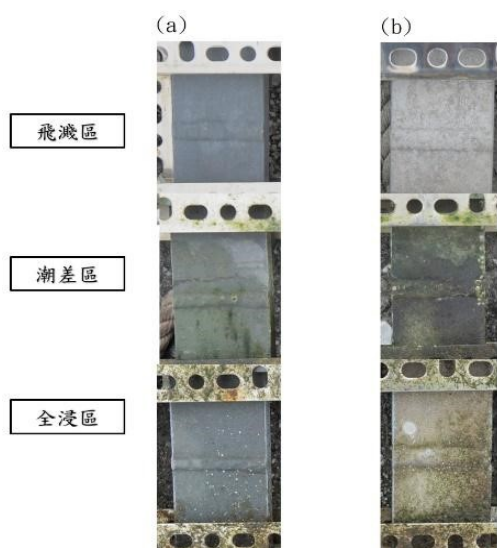


圖 26 試驗四個月(a)鋅鋁，(b)純鋁。
Figure 26 Four month testing (a) pure aluminum, (b) zinc-aluminum.

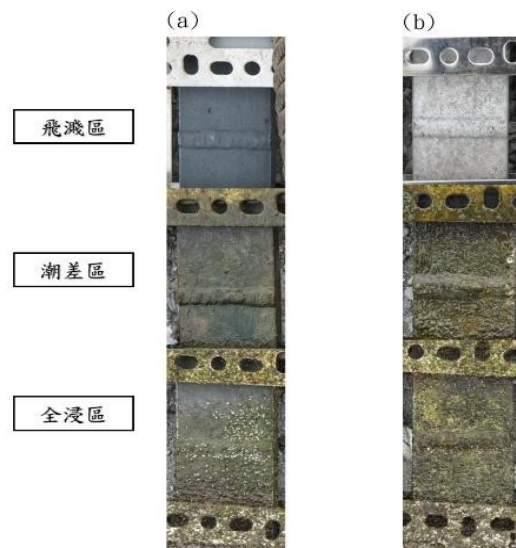


圖 27 試驗五個月(a)鋅鋁，(b)純鋁。
Figure 27 Five month testing (a) zinc-aluminum, (b) pure aluminum.

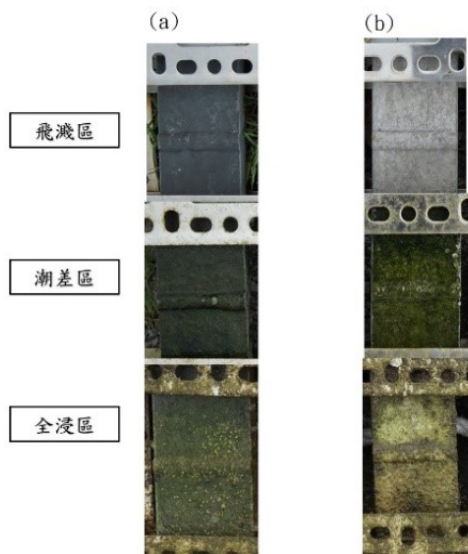


圖 28 試驗六個月(a)鋅鋁，(b)純鋁。
Figure 28 Six month testing (a) zinc-aluminum, (b) pure aluminum.

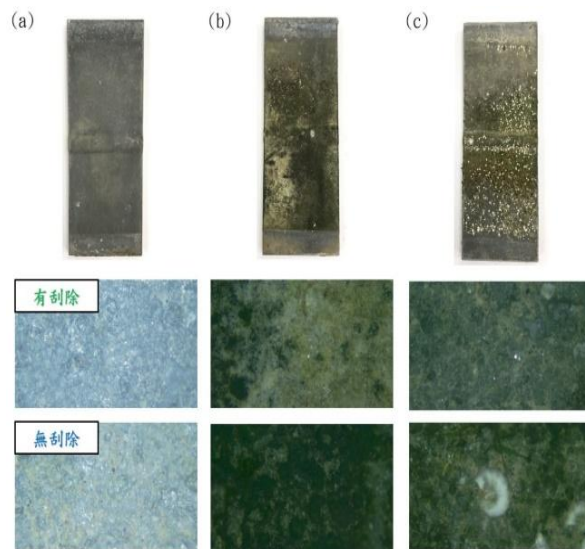


圖 29 鋅鋁試片試驗五個月(a)飛濺區，(b)潮差區，(c)全浸區，光學顯微鏡觀察(有刮除及無刮除)。
Figure 29 OM image of the zinc-aluminum through five month testing (a) splash area, (b) tidal area, (c) full immersion area.

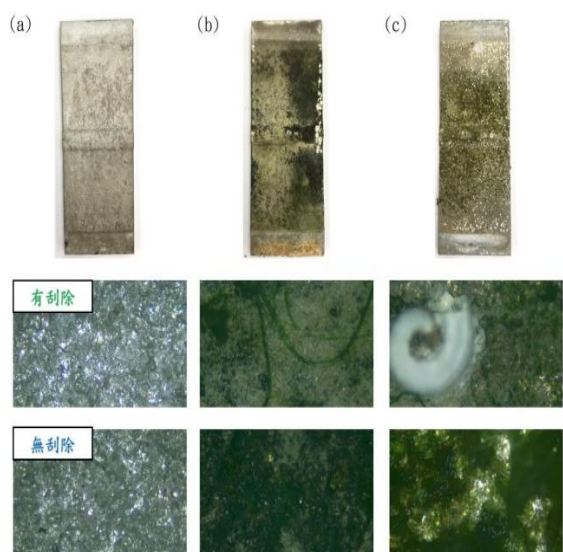


圖 30 純鋁試片試驗五個月(a)飛濺區，(b)潮差區，(c)全浸區，光學顯微鏡觀察(有刮除及無刮除)。

Figure 30 OM image of the pure aluminum through five month testing (a) splash area, (b) tidal area, (c) full immersion area.

HVOF 試片在經過 1 個月後，在任何區域已經明顯產生腐蝕，尤其在全浸區，已發生破裂及孔洞，甚至剝落，表面已經殘破不堪；在經過兩個月的試驗後，在飛濺區已產生許多腐蝕孔洞，有許多鏽蝕現象，在潮差區表面則凹凸不平且嚴重腐蝕，全浸區試片表面則已有大面積剝落以及許多破裂孔洞產生(圖 31)。

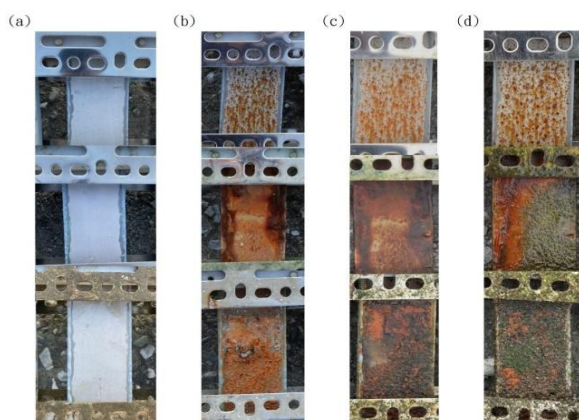


圖 31 HVOF 試片試驗(a)初始，(b)一個月，(c)兩個月，(d)三個月。

Figure 31 High velocity flame spraying (a) original, (b) one month, (c) two month, (d) three month.

4. 結論

本研究以無溶劑環氧樹脂漆熔射 $300\ \mu\text{m}$ 之純鋁及鋅鋁及 HVOF 鐵基非晶質合金於離岸風機機樁水下基礎塗樁進行相同防蝕測試，其結果如下：(1)在冷熱交變實驗及沖蝕實驗下，環氧試片在的 5 次循環後，未有腐蝕方能有效的包覆阻止腐蝕；(2)純鋁及鋅鋁試片則在的 7 次循環後，產生輕微腐蝕。(3) HVOF 試片則在第 2 次循環，產生嚴重腐蝕。(4)海水吊掛試驗經過六個月後在海水飛濺區皆無明顯變化；在潮差區有許多青苔附著於表面；鋅鋁、純鋁受到青苔附著無法輕易去除，在全浸區亦受到貝類及藻類附著，透過光學顯微鏡觀察表面也可以發現許多貝類殘留，也有些微腐蝕現象。

參考文獻

- [1] European Commission, “National Renewable Energy Action Plan (NREAPs)”, 2009.
- [2] “Statistical effects of surface preparation and coating type on the corrosion protection performance of repair coatings for offshore wind power constructions”, A. W. Momber, S. Buchbach, P. Plagemann, T. Marquardt, I. Winkels, and J. Viertel, *Materials and Corrosion*, 69 (2018) pp. 460-471.
- [3] “Development of a superhydrophobic and bactericide organic topcoat to be applied on thermally sprayed aluminum coatings in offshore submerged components”, A. López-Ortega, O. Areitioaurtena, S. A. Alves, A. M. Goitandia, I. Elexpe, J. L. Arana, R. Bayón, *Progress in Organic Coatings*, 137 (2019) p. 105376.
- [4] “DGEBA-polyaminoamide as effective anti-corrosive material for 15CDV6 steel in NaCl

- medium: Computational and experimental studies”, O. Dagdag, A. Berisha, Z. Safi, O. Hamed, S. Jodeh, C. Verma, E. E. Ebenso, and A. El Harfi, *Journal of Applied Polymer Science*, 137 (2020) p. 48402.
- [5] “Study of the physical and electrochemical properties of hybrid paint system based on zinc-rich primer for mild steel protection”, A. Al-Huseini, R. Kasi, A. Shafaamri, I. A. W. Ma, and R. Subramaniam, *Pigment & Resin Technology*, 49 (2020) pp. 33-40.
- [6] “Mild steel surface eco-friendly treatment by Neodymium-based nanofilm for fusion bonded epoxy coating anti-corrosion/adhesion properties enhancement in simulated seawater”, M. Ramezanzadeha, G. Bahlakehb, B. Ramezanzadeha, and M. Rostamic, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72 (2019) pp. 474-490.
- [7] “Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatings”, J. Sinko, *Progress in Organic Coatings*, 42 (2001) pp.267-282.
- [8] “Characterization of the permeability of a high performance composite coating to cathodic protection and its implications on pipeline integrity”, A.Q. Fu, Y. F. Cheng, *Progress in Organic Coatings*, 72 (2011) pp. 423-428.
- [9] 林美鳳〈綠能商機〉離岸風電下一個兆元產業自由時報，
<https://ec.ltn.com.tw/article/paper/1222115>。
- [10] ISO 12944-9: Paints & Varnishes, Corrosion Protection of Steel Structures by protective paint systems Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures, 2018.
- [11] NORSOK K standard M-501: Surface Preparation and Protective Coating, 2012.
- [12] ISO 20340: Paints and varnishes, Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures, 2009.
- [13] “離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估”，吳興練，*防蝕工程*，第 30 卷第 1 期，2016，第 24 ~ 37 頁。
- [14] 鄭錦榮，「離岸風機海上結構物腐蝕監測及風機資產管理」台灣電力公司綜合研究所，2015。
- [15] 交通部中央氣象局，取自 <https://www.cwb.gov.tw/V7/marine/stat/cht/sst/1436.html>。
- [16] “Long-term atmospheric corrosion properties of thermally sprayed Zn, Al and Zn-Al coatings exposed in a coastal area”, H. Katayama and S. Kuroda, *Corrosion Science*, 76 (2013) pp. 35-41.