

離岸風機水下基礎塗裝耐蝕性及耐海水沖蝕性研究 Study on the seawater corrosion and erosion resistance of paintings used for the foundation structure of offshore wind turbine

詹子寬¹、吳宗峯²、吳興練²、李弘彬^{*1}

Zi-Kuan Zhan¹, Hsing-Lien Wu², Tsung-Feng Wu², Hung-Bin Lee^{*1}

中文摘要

本研究依據指定三種塗料(A、B、C)進行評估試驗，使用冷熱交變試驗與沖蝕試驗模擬台灣氣候、海浪沖擊對離岸風機基礎塗層的影響，並配合紫外光加速老化試驗(QUV)及衝擊測試以瞭解塗層的附著性及耐撞擊能力。研究結果顯示，以A塗料採用防蝕帶其腐蝕最為嚴重，受到水流沖蝕以及冷熱交變，導致外部包覆材料之玻璃纖維及樹脂明顯變薄，內部形成包覆層下的腐蝕；其次為B塗料採用無溶劑型環氧樹脂漆，切割時塗層容易龜裂，可能原因塗層與底材金屬附著力不佳，受到衝擊測試試片上塗層有龜裂行為；C塗料採用聚尿，經測試，為三者腐蝕損傷影響最小。

關鍵詞：離岸風機、紫外光加速老化試驗機、耐衝擊、耐腐蝕。

Abstract

Three different designated paintings (A, B, C) were employed in the experimental evaluation of their corrosion and erosion resistances in seawater. Both temperature alternation and erosion were considered to simulate the climate and wave impact on the foundation structure of offshore wind turbine in Taiwan. Moreover, QUV accelerated weathering test and impact test were conducted to study the adhesion and impact property of the paintings. The results showed the most serious corrosion occurred for the A painting which was a tapecoat. The water erosion and temperature alternation caused the quick thinning of outer fiberglass/resin wrap material and

收到日期：109年09月10日

修訂日期：109年10月04日

接受日期：109年12月09日

¹ 國立台灣海洋大學光電與材料科技學系暨海洋工程科技中心

¹ Department of Optoelectronics and Materials Technology & Center of Excellence for Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung 202, Taiwan

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

*聯絡作者：lhb6018@mail.ntou.edu.tw

subsequently the corrosion of underneath substrate. The next serious corrosion happened to the B painting which was a solvent-free epoxy resin. The brittleness of the coating and its inferior adhesion with substrate easily induced cracking when subjected to impact loading. The C painting which consisted of mainly carbamide resin showed the least damage from the experimental testing.

Keywords: Offshore wind turbine; QUV accelerated weathering test; Impact resistance; Corrosion resistance.

1. 前言

1.1 國內外臨海腐蝕防護技術現況與發展

隨著經濟的不斷發展，離岸風機、船舶運輸、跨海大橋、海洋交通設施等不斷增加。沿海更擁有大量的海港碼頭、臨海太陽能電廠等設施。海洋工程設施通常由金屬材料（特別是鋼鐵）、鋼筋混凝土材料等製造而成。台灣地處亞熱帶，天候溫度高及日照強度大，且因四周臨海，相對濕度與空氣中含鹽量均高，因此臨海水下環境對海上結構物腐蝕結構材料之耐久性影響甚鉅^[1-3]。

從腐蝕控制的主要類型，塗料（塗層）是最主要的控制方法，耐腐蝕材料次之。表面處理與改質是常用的腐蝕控制方法，電化學保護（犧牲陽極與外加電流）是海洋結構腐蝕控制的常用手段，緩蝕劑在介質相對固定的內部結構上經常使用，結構健康監測與檢測技術是判定腐蝕防護效果，掌握腐蝕動態以及提供進一步腐蝕控制措施決策和安全評價的重要依據。腐蝕安全評價與壽命評估是保障海洋工程結構安全可靠和最初設計時的重要環節。

防腐蝕塗料領域應用主要有：環氧類防腐塗料、聚氨酯類防腐塗料、橡膠類防腐塗料、氟樹脂防腐塗料、有機矽樹脂塗料、聚脲彈性體防腐塗料以及富鋅塗料等。實際上，從塗料使用的分類來看，塗料可以分為：底漆、中間漆和面漆。其中，底漆主要包括富鋅底漆（有機：環氧富鋅；無機：矽酸乙酯）、熱噴塗鋅；中間漆主要有環氧雲鐵、環氧玻璃鱗片；面漆包括聚氨酯、丙烯酸樹脂、乙炔樹脂、氟碳樹脂及含氟聚氨基醃等。

1.2 離岸風力發電機現況與發展

台灣因四周臨海，相對濕度與空氣中含鹽量均高，受海水飛沫中含有的氯化鈉顆粒影響，臨海 200 公尺以內的陸地環境腐蝕也屬於海洋環境腐蝕的範疇。在臨海水下環境中服役的基礎設施和重要工業設施的腐蝕問題嚴重，特別是船舶、海洋平台、離岸風機與臨海太陽能電廠的腐蝕問題更加突出，腐蝕已經成為影響船舶、近海工程、遠洋設施服役安全、壽命、可靠性的最重要因素，引起世界各國政府和工業界的高度重視。因此，大力發展臨海水下工程防腐材料和技術，對於保障離岸風機工程和臨海太陽能電廠的服役安全與可靠性，降低重大災害性事故的發生，延長海洋構築物的使用壽命具有重大意義。因此，海洋環境對離岸風力發電機及海上結構物腐蝕結構材料之耐久性影響甚鉅。離岸風力發電機的設備建置包括風機本體、水下基座、以及包括海底電纜在內之電力系統等。離岸風力發電機的防蝕要求高，通常依據 ISO 12944-9、NORSOK M501、ISO 20340^[4-6]等規範規定之測試方法進行。離岸風力發電機關鍵材料與結構（風機的基座、塔架、葉片、發電機等）在對應環境介質中（海水、海浪、沙塵暴及高低溫度）的腐蝕環境行為研究，可有效評估風機塔架材料使用特性及維護改善週期，節省零件破損、定期維修費用與增進經濟效益，延長機組材料的使用壽命及可靠度。

1.3 離岸風力發電機腐蝕環境與防腐措施

離岸風力發電機結構分成五大部分，主要分

成 1.海洋大氣區 2.海水飛濺區 3.潮差區 4.全浸區 5.海泥區，每一部分相對於腐蝕保護具有不同的要求，共有 5 種腐蝕區塊，不同區塊的腐蝕特性和程度不同，應分別採取不同防腐措施^[7,8]。

離岸風機有別於傳統的陸域風機，塔架處於海洋惡劣環境必須有較高的抗鹽害、耐應力腐蝕與抗沖蝕等特性。傳統塔架為解決鋼材飛沫帶與潮汐帶所致環境劣化，一般採用熱噴覆鋁材加上含有石英玻璃鱗片或玻璃纖維的厚膜有機塗裝進行保護。然而我國位處亞熱帶地區，在海域上的塔架因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，因高鹽分水氣滲入而導致塔架嚴重腐蝕與應力腐蝕。此外，洋流沖蝕甚至颱風引起的海浪沖擊都將導致塗層剝落。

ISO 12944-9^[4]提出大氣腐蝕環境可劃分為 7 個等級：C1（非常低）；C2（低）；C3（中等）；C4（高）；C5I（很高，工業環境）；C5M（很高，海洋環境）與 CX（極高，海洋環境）(表 1)。水和土壤腐蝕環境則劃分為 4 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。國際上採用 ISO 12944-9 標準對腐蝕環境分類、塗層體系選擇及性能評價。針對海上結構物歐洲採用 NORSOK M-501 標準，美國為 NACE SP0108 等規範。而以 NORSOK M-501 最被廣泛地接受。就離岸風力發電機而言，與大氣環境接觸部分須符合 C5M 與 CX 防蝕等級以上，基座須符合 Im2 防蝕等級以上^[5]。

表 1 ISO12944-9 環境分類^[4]。
Table1 Environment types of ISO 12944^[4].

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/m²}	Thickness loss _{μm}	Weight loss _{g/m²}	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. 研究方法

2.1 風力發電的結構

風力發電是綠能產業重要的發展項目，世界各國因陸域風場的飽和與場址限制，風力發電皆朝向將風機設置在離岸近海位置，但離岸風機處於海洋惡劣環境，因此離岸風機必須有較高的抗鹽害、耐潮濕與耐腐蝕沖蝕等特性，為提升離岸風機耐久性，針對風機塔架在現有工業技術下，在塔架製造場區內即先進行防蝕施工，研發抗海洋環境侵蝕方案，以提升塔架耐海洋環境鹽害及抗海洋潮汐沖蝕能力。

依據先前國內業界經驗得知：臨海設施於構件表面包覆耐蝕高分子材料，其劣化主因並非包覆材料耐鹽害腐蝕能力不足，主要成因為在於使用期間日照所導致的溫度交變現象，使得包覆材料與鋼結構物因熱漲冷縮而分離，彼此間的空隙誘發後續嚴重的腐蝕現象。台灣夏季高溫曝曬將使風機鋼結構體快速升溫膨脹，而高分子黏結劑因日照紫外線老化、脆化不利於彼此長期附著。此外，塗層材料亦不耐海洋沖蝕，因此以高分子材料黏著包覆風機塔架，應不足以維持風機塔架長期耐蝕能力。

本計畫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，使用複合式溫度交變腐蝕試驗機探討含鹽環境下溫度交變對塗層所致的劣化。另外，針對波浪與潮汐部分甚至颱風引發強大海浪沖擊，運用腐蝕沖蝕實驗機來瞭解海浪浪擊對防蝕塗層的影響，並配合紫外光加速老化試驗機(QUV)進行全面評估研究。

2.2 試片的製備

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，塗層包括富鋅底漆，熱浸鍍鋅、熱熔射(鋁、鋅鋁)，環氧

樹脂、聚氨樹脂、氟碳樹脂等，各塗層的厚度變化，以及底材的種類。塗裝試片的製作底材為碳鋼，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。隨後進行鹽霧腐蝕環境耐蝕性能評估，採用沖蝕腐蝕試驗瞭解海浪浪擊對防蝕塗層的影響並配合 QUV 試驗 (UVA340nm / 0.89W/m²·nm / 60±3°C) 進行全面評估研究。

離岸風機耐蝕塗層失效可能源自：1.最表層因海水沖蝕或季風夾帶雨水打擊失效，2.塗層經海水濕潤後日照導致腐蝕溫度上升與鹽度升高而大幅縮短塗層耐蝕性，3.塔架日照後溫度上升但塗層因海水噴濺而冷卻，鋼製塔架與塗層熱膨脹系數差值，將導致塗層龜裂或兩者界面分離而失效，因此本研究將模擬實際冷熱交變試驗及沖蝕環境進行試驗。

海水溫度設定採用氣象局觀測站數據^[9]，選取地理位置為台灣近海海水、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 15°C 及 30°C。

2.3 試驗方法

1. 冷熱交變環境與沖蝕腐蝕試驗：本研究採用指定系統之塗裝條件(表 2)，進行評估試驗。
2. 冷熱交變環境耐腐蝕試驗：採用 3 種塗裝試件。首先將試片經室溫海水濕潤後加熱至 60°C/25min，試片再以海水冷卻至 15°C/25min 並低溫噴灑 15 分鐘為一次循環，共持續 2 天，進行環境溫度交變之腐蝕試驗。
3. 沖蝕腐蝕試驗：採用沖蝕腐蝕試驗機模擬水流速度，依台灣近海所做的相關調查，來模擬波浪與潮汐部分甚至颱風引發強大海浪沖擊，運用沖蝕腐蝕實驗，瞭解海浪浪擊對防蝕塗層的影響，實驗試件與沖蝕水流角度(0°)以模擬未來塔架可能因洋流沖蝕最嚴重區域，實驗條件：

- 沖蝕速度：4 m/s，溫度 15-30°C為一次循環，共持續 2 天。
4. 紫外光加速老化試驗機(QUV) (UVA340nm / 0.89W/m²·nm / 60±3°C12h + 水冷凝 50±3°C12h)，試驗 25 周(4200h)循環測試進行塗層評估。
5. 衝擊測試:比較 B 塗裝與 C 塗裝時離岸風機飛濺區塗裝系統經衝擊測試後的漆膜所能承受之能耐程度。選用直徑½吋與¼吋之撞針砝碼 1000g 分別從 50cm，40cm，30cm 落下。
6. 冷熱交變環境試驗與沖蝕腐蝕試驗後試片表面狀態觀察。

表 2 離岸風機飛濺區之塗裝系統。

Table2 Coating systems of test specimens for splash and tide zone.

Painting system	A	B	C
Steel materials	Flat : 74mmX150mmX5mm, Round tube : Outer diameter Ø50.2mm X8.5mm		
Weld bead	Grinding		
Surface treatment	Sa2.5 , 85um >Ra>50um		
undercoat	Bisphenol A-type epoxy diacrylates resin EM450-glass fiber mesh	Solvent-free epoxy paint	EP-116
Primer surfacer	Bisphenol A-type epoxy diacrylates resin EM8000-glass fiber	Solvent-free epoxy paint	UP-204
finish paint	High temperature anti-corrosion wax tape	Polyurethane (PU) finish paint	UP-100

3. 結果與討論

3.1 冷熱交變與沖蝕腐蝕試驗

首先實驗以 A 試片的防蝕塗料進行冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗，第一次結束，A 試片的防蝕帶都出現了些微的腐蝕現象，測試結果，防蝕帶並沒有發生龜裂、水泡或是剝離現象，初步推斷沒有滲漏到與鋼材的夾層中；第二次及第三次結束，可以發現試片的表面出現玻璃纖維，推測試片腐蝕已經有一定的程度(圖 1)；第四次結束後進行觀察，表面明顯出現玻璃纖維與間隙腐蝕，甚至可以看到整體外部腐蝕情況，故將試片進行各個角度觀察(圖 2)，可以發現試片在 0°角正面受到沖蝕的效果沒有比 90°以及 270°側面來的明顯，可推測是因為水流沖蝕導致玻璃纖維在 45°切線處腐蝕更加嚴重。將原始試片以及試驗試片橫切

面進行觀察，試驗後試片明顯比原始試片來得更薄，尤其在切線處，因此進行量測，量測結果(圖 3)，發現在 45°切線防蝕帶塗層實驗後厚度相比原始試片來的薄，差距大約 2mm，而試片 270°背面厚度減少約 1mm，由此可推斷冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗導致外部玻璃纖維全體變薄。最後觀察防蝕帶與鐵基材腐蝕情形(圖 4)，將其剝開後可以很明顯觀察到鐵基材以及防蝕帶介面腐蝕嚴重，因此推斷試片受到是海水鹽霧影響，內部腐蝕受到海水的影響形成間隙腐蝕或孔穴腐蝕，再擴散至鐵基與玻璃纖維界面，持續腐蝕導致整體內部嚴重受損，而鐵基材料主要腐蝕類型屬全面不均勻腐蝕和點蝕，表面氧化膜局部破壞而產生銹點聚集；包覆材料(玻璃纖維及樹脂)若具吸水性並加上容易積水的設計，長期暴露在潮濕環境下會

導致腐蝕的發生，藉由包覆材料的虹吸作用產生間隙腐蝕，推測為包覆層下腐蝕(Corrosion Under Insulation, CUI)機制。由於 A 試片經過冷熱交變試驗、沖蝕腐蝕試驗後腐蝕嚴重，故無進行 QUV 試驗以及衝擊測試。

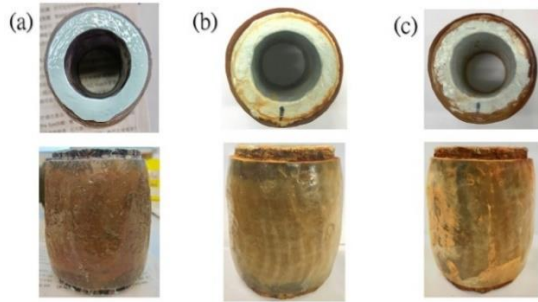


圖 1 A 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試(a)原始試片(b)第二次(c)第四次。

Figure1 The cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test for sample A: (a)original test piece (b) operated for second cycles (c) operated for fourth cycles.



圖 2 A 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試第四次之各角度觀察。

Figure2 Observation from all angles of sample A carried out with the cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test operated for fourth cycles.



圖 3 A 試片橫切剖面與厚度觀察(a)原始試片(b)第四次。

Figure3 Cross section and thickness observation of sample A: (a) original test piece, (c) operated for fourth cycles.

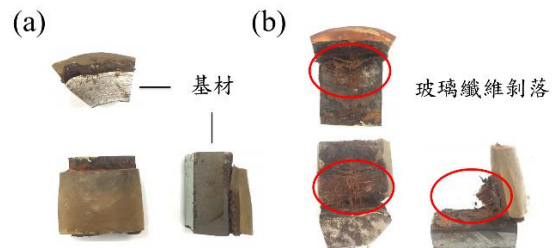


圖 4 A 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試第四次切割試片與觀察(a)基材與塗層(b)剖開觀察外層防蝕帶。

Figure4 The cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test carried out fourth times for sample A, and its cross-sectional pictures: (a) substrate and coating (b) cut and observe the outer anti-corrosion tape.

B 試片在冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗循環第一次結束，與原始試片對比無明顯腐蝕現象，持續至第二次，可以發現試片側面上層有些許龜裂，第四次更為明顯，實驗至第六次結束(圖 5)，觀察發現側面上層與下層皆有少許龜裂行為，接著進行各角度觀察，觀察結果(圖 6)，發現在試片上下層明顯龜裂，接著透過光學顯微鏡觀察，觀察結果(圖 7)，可以發現試片厚度並無明顯減少，因此推斷試片先切割後可能導致鍍層容易龜裂，受到水流沖蝕、冷熱交換影響，可能油漆與金屬的附著力不是很好，因而導致試片上下層龜裂，受到水流沖蝕影響導致在約 45°切線處(圖 8)，產

生破損更加嚴重，而海水鹽霧影響則導致邊際破損(不明顯)產生腐蝕行為。

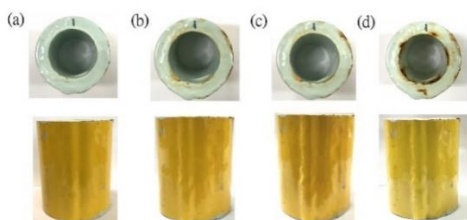


圖 5 B 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試(a)原始試片(b)第二次(c)第四次(d)第六次。

Figure5 The cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test for sample B: (a) original test piece, (b) operated for second cycles, (c) operated for fourth cycles, and (d) operated for sixth cycles.

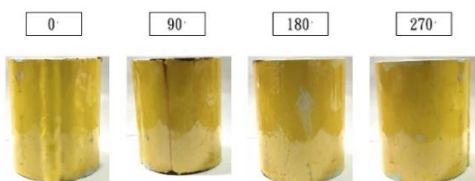
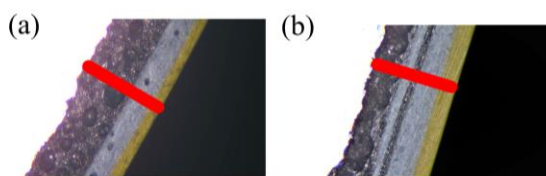


圖 6 B 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試第六次之各角度觀察。

Figure6 Observation from all angles of sample B carried out with the cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test operated for sixth cycles.



試片厚度:665.33um 試片厚度:632.90um

圖 7 B 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試(a)原始試片(b)第六次顯微鏡觀察厚度。

Figure7 The images of microscope observation thickness of sample B carried out with the cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test: (a) original test piece, (b) operated for sixth cycles.



圖 8 B 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試第六次之上下層龜裂情形。

Figure8 Cracks occurred at the upper and lower layers of sample B carried out with the cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test operated for sixth cycles.

C 試片在冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗循環第一次結束，發現外觀沒有什麼變化，試驗持續循環六次後(圖 9)，依然沒有明顯腐蝕現象，只有表面有銹水殘留，清理後便無異常，所以將原始試片及實驗試片進行橫切觀察，發現原始試片與試驗試片並無明顯差異，接著用光學顯微鏡觀察原始試片以及試驗試片厚度，觀察結果(圖 10)，僅 10-20um 差異甚至無減少，可以推測 C 試片在經過冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗循環結束發現並無腐蝕現象。

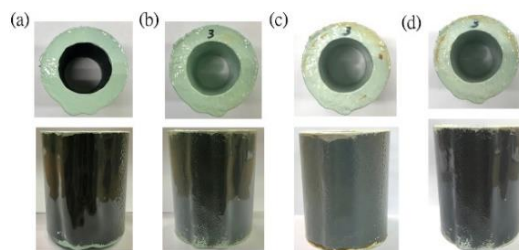


圖 9 C 試片進行冷熱交變實驗及沖蝕實驗之循環測試(a)原始試片(b)第二次(c)第四次(d)第六次。

Figure9 The cycle test of the cold and heat alternating test and the erosion test for sample C: (a) original test piece, (b) operated for second cycles, (c) operated for fourth cycles, and (d) operated for sixth cycles.

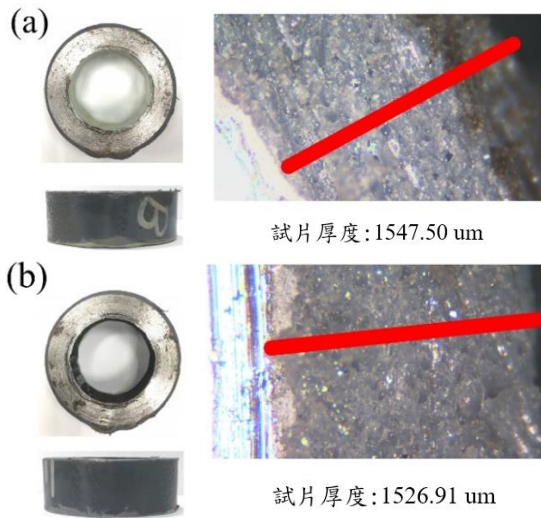


圖 10 C 試片觀察橫切面變化與厚度(a)原始試片(b)第六次循環。
Figure10 Cross section and thickness observation of sample C: (a) original test piece, (c) operated for sixth cycles.

道衝擊測試，觀察受到衝擊後有無破損產生。在經過平面衝擊測試後得結果(圖 11)，可發現 C 試片不論是選用直徑 $\frac{1}{2}$ 吋與 $\frac{1}{4}$ 吋受到撞針砝碼在 50cm、40cm、30cm 皆無明顯受損；而 B 試片在直徑 $\frac{1}{2}$ 吋撞針砝碼 50cm 處、 $\frac{1}{4}$ 吋撞針砝碼在 50cm 與 40cm 處皆有破損行為，甚至在 $\frac{1}{4}$ 吋撞針砝碼 50cm 處有貫穿現象。經過銲道衝擊測試後觀察(圖 12)，可發現 C 試片皆無破損產生；而 B 試片在受到 $\frac{1}{2}$ 吋撞針砝碼 50cm 與 40cm 處皆有嚴重破損。測試結果如表 3 與 4，檢測結果發現 C 塗裝在衝擊上優於 B 塗裝。B 試片與 C 試片進行 QUV 試驗結果(圖 13)，試片於試驗後，包括銲道及非銲道區均無發生塗膜剝離現象，推測沒有腐蝕現象。

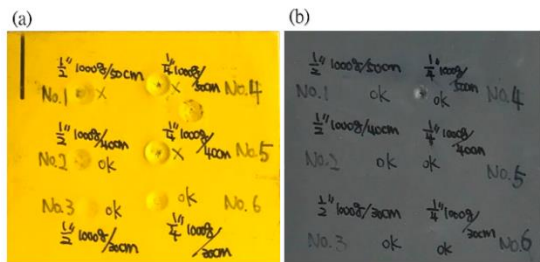


圖 11 平面沖擊測試(a)B 試片(b)C 試片。
Figure11 Plane impact test: (a) sample B, (b) sample C.

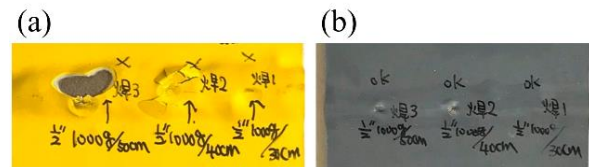


圖 12 銲道衝擊測試(a)B 試片(b)C 試片。
Figure12 Weld bead impact test: (a) sample B, (b) sample C.

3.2 衝擊測試與 QUV 試驗

衝擊測試採用 B 塗裝與 C 塗裝離岸風機飛濺區塗裝系統經衝擊測試後漆膜所能承受之能耐程度，選用直徑 $\frac{1}{2}$ 吋與 $\frac{1}{4}$ 吋之撞針砝碼 1000g 分別從 50cm、40cm、30cm 落下，進行平面衝擊測試與銲

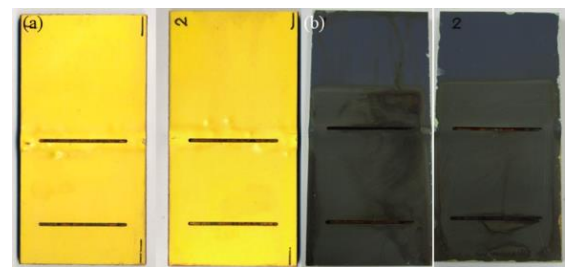


圖 13 紫外光加速老化試驗(a)B 試片(b)C 試片。
Figure13 UV accelerated aging test: (a) sample B, (b) sample C.

表 3 平面衝擊測試。

Table3 Plane impact test

Plane impact test	1000g/50cm	1000g/40cm	1000g/30cm
C painting ½	OK	OK	OK
B painting ½	NG	OK	OK
C painting ¼	OK	OK	OK
B painting 1/4	NG(Penetrated and split)	NG	OK

表 4 銲道衝擊測試。

Table4 Weld bead impact test

Weld bead impact test	1000g/50cm	1000g/40cm	1000g/30cm
C painting ½	OK	OK	OK
B painting ½	NG	NG	OK

4. 結論

本實驗透過冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗、QUV 試驗及衝擊測試等實驗評估，檢測 A、B、C 三種試片，其結果如下：

A 試片呈現嚴重腐蝕，受到冷熱交變與沖蝕腐蝕試驗，導致外部包覆材料(玻璃纖維及樹脂)明顯變薄，內部形成包覆層下腐蝕。受沖蝕腐蝕影響導致玻璃纖維在約 45°切線處薄化更加嚴重。海水鹽霧滲入界面處，鋼材受到海水影響形成間隙腐蝕或孔穴腐蝕，再由外表面全面擴散至鋼材與玻璃纖維界面，內部持續腐蝕導致整體內部嚴重受損，推測為包覆層下腐蝕(CUI)腐蝕機制。

B 試片易因切割時塗層容易龜裂，其可能原因為塗層與底材金屬的附着力不佳，因而導致試片上塗層龜裂。水流沖蝕導致在約 45°切線處較易觀察到破損現象。海水鹽霧導致邊緣破損(不明顯)產生腐蝕行為。

C 試片透過冷熱交變試驗與沖蝕腐蝕試驗、QUV 試驗及衝擊測試等實驗評估，試片無明顯腐蝕行為。衝擊測試包含銲道及非銲道區之塗層檢測結果發現 C 塗裝系統無貫穿、開裂現象。QUV 試驗包含銲道及非銲道區之塗層均無剝離現象，

為三者之中影響最小。

台灣環境與歐洲環境大不相同，為高溫、高濕度、高鹽份及海流，一旦有颱風帶來的豪雨強浪沖刷，大量漂流木漂流於海上撞擊到離岸風機，可能會導致外層塗料沖蝕薄化或撞擊破裂剝落。建議增加檢測項目或提高耐腐蝕標準。如：衝擊試驗及沖蝕實驗。

參考文獻

- [1] National Renewable Energy Action Plan (NREAPs), European Commission, 2009.
- [2] "Statistical effects of surface preparation and coating type on the corrosion protection performance of repair coatings for offshore wind power constructions.", Momber, Andreas W., et al., Materials and Corrosion 69.4 (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.", López-Ortega, A., et al., Progress in Organic Coatings

137 (2019), 105376.

- [4] ISO 12944: Paints & Varnishes - Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems, 1998.
- [5] NORSOK M501: Surface Preparation and Protective Coating, (1999). °
- [6] ISO 20340:Paints and varnishes , Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures, 2009.
- [7] “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。
- [8] 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。
- [9] 交通部中央氣象局 (2000-2019) ，取自 https://www.cwb.gov.tw/V8/C/C/MMC_STAT/sta_sea.html