



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.201809_32(3).0004

海氣象觀測塔螺栓斷裂原因分析 Failure Analysis of the Bolt Fracture in the Met Mast

吳宗峯*¹

Tsung-Feng Wu*¹

中文摘要

由於溫室效應日益嚴重，發展綠色能源已成為全球的重要趨勢，台灣海峽為全球最佳離岸風電場域之一，因此，離岸風機成為政府發展綠能產業之重要項目。然因離岸與陸上風機於風力、溫濕度及腐蝕環境均存在著明顯之差異，故於發展先期建置海氣象觀測塔，用以監測未來離岸風力發電機可能遭遇的風況，同時記錄長期環境的變化，以評估環境對葉片、塔架材料及耐蝕塗層的影響。本文針對某海氣象觀測塔塔體法蘭螺栓發生斷裂的現象，進行原因調查與分析。分析結果顯示：破斷面表面可偵測到高濃度之 Zn、P 等元素，而此元素並不存在於材質本身與外界環境中，應為螺栓於製作後、於未施作表面皮膜處理前已發生裂縫，導致於進行磷酸鹽皮膜處理時，Zn、P 等元素滲入裂縫鍍於破斷表面上。於螺栓鎖固完成後，此裂縫處即成為應力集中點，此時，螺栓於承受來自鎖固之扭力與外界風力之反覆應力下，加上來自海上環境之腐蝕性 Cl 離子侵入，而造成此區發生腐蝕疲勞現象。而隨著裂縫持續傳播，當剩餘之截面積無法承受外界之應力時，最終導致裂縫快速傳播而斷裂之結果，屬於螺栓加工不當或製程瑕疵，致使此應力集中處成為後續腐蝕疲勞發生之起始位置。

關鍵詞：離岸風機、海氣象觀測塔、螺栓斷裂。

Abstract

Green energy development has become the important tendency due to the Greenhouse effect getting worse and worse. Taiwan Strait is one of the best off-shore windfarm field in the whole world, therefore, off-shore wind power generation turns into the most important item of green industrial development for the Taiwan government. However, apparent differentials in wind, temperature, humidity and environment are existed between off-shore and on-land wind generation, so it will be necessary to set up the met mast to monitor the variations of the wind condition and the long-term environment where occurred for the off-shore windfarm. The effect of environment

收到日期：107 年 04 月 20 日

修訂日期：108 年 12 月 31 日

接受日期：109 年 03 月 25 日

¹ 中國鋼鐵股份有限公司 綠能與系統整合研發處

¹ Green Energy & System Integration R&D Development Dept., China Steel Corporation, Taiwan.

*聯絡作者：152140@mail.csc.com.tw

on blade, structure materials, and coating will be thus evaluated. In this study, the failure analysis is employed to explore why and how the bolts of structure flange fail. Experimental results reveal that high content of zinc and phosphorous are detected on the fracture surface of the bolts, which are not essentially existed in both material and environment. It's considered that these elements are coming from the phosphate film which is treated for the anti-corrosion purpose following the bolt producing. In other words, the cracks have formed before the phosphating process. These cracks would subsequently be the initiation site of the fracture as corrosion fatigue mode under the situation of repeated stress applied by outer wind power and environment of aggressive chloride ion, and then propagate quickly while residual cross section area too small to bear the outer stress. Which results in the fracture and the bolt failing. This failure is resulted from the improper processing or materials defect of bolt.

Keywords: Off-shore wind generation, Met mast, Bolt fracture.

1. 前言

台灣海峽為全球最佳離岸風電場域之一，加上發展綠色能源已成為全球的重要趨勢，故政府已於 101 年 2 月核定「千架海陸風力機」計畫^[1]，以「先開發陸域風場，續開發離岸風場」作為推動策略，逐步帶動風電發展由陸域推向離岸。然因離岸與陸上風機於風力、溫濕度及腐蝕環境均存在著明顯之差異，故於發展先期建置海氣象觀測塔，用以監測未來離岸風力發電機可能遭遇的風況，同時記錄長期環境的變化，以評估環境對葉片、塔架材料及耐蝕塗層的影響。某海氣象觀測塔塔體法蘭螺栓發生斷裂的現象，此法蘭為連接觀測塔上段與中段塔體，並以螺栓固定之。於某次例行性巡檢時發現 90 根螺栓中，有 4 根發生斷裂。為瞭解螺栓斷裂發生之原因，遂針對斷裂螺栓進行破損分析，以避免類似的事件再度發生。

2. 實驗方法

2.1 目視觀察

前往現地進行螺栓斷裂位置確認及現場環境勘查，並詢問規劃及施工廠商於實地安裝之現況。另外，於斷裂螺栓試片取回實驗室後，利用數位相機及實體顯微鏡進行破斷面破裂形貌之巨觀觀察及初步鑑定，並確認後續進一步細部觀察之區域及分析方法。

2.2 材質分析

為確認螺栓材質是否符合設計規範要求，擷

取#2 及#3 螺栓試片，利用分光分析儀進行材質成分分析，並與廠商先前自行送測之檢測結果及規範之要求進行比對，藉以確認材質是否有異常或誤用的情況發生。

2.3 微硬度量測

由於斷裂之螺栓試片過小，無法製作成拉伸試片以獲得其機械性質，遂利用微硬度計針對截面上不同位置進行其硬度值之量測，並獲得不同位置硬度值之分布差異，藉以確認該螺栓之機性是否符合規範要求，以及是否有分布不均之情況發生。

2.4 金相組織觀察

針對#2、#3 斷裂螺栓，以光學顯微鏡(optical microscopy, OM)進行金相組織觀察，藉以評估其冶金性質及後續之熱處理程序是否滿足規範要求。

2.5 螺栓表面鍍層分析

此螺栓於表面曾施作磷酸鹽皮膜處理，為了確認此製程及其皮膜之厚度，遂擷取螺栓之截面進行近表面處之掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscopy, SEM)觀察，並利用電子微探針分析(electron probe microanalyzer, EPMA)進行成分分析。

2.6 破斷面觀察與微區成分分析

利用 SEM 進行破斷面之破裂形貌觀察，並藉

以鑑別其破裂型態。另外，利用能量散佈光譜儀 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 進行破斷面上不同區域之微區成分分析，藉以鑑別表面腐蝕生成物之組成與分布狀況，並由其結果綜合研判發生破損之可能原因。

3. 結果與討論

3.1 目視觀察結果與安裝履歷說明

圖 1 為第一次發現螺栓斷裂時之螺栓位置分布，共有 3 根發生斷裂，發生之位置並無集中於

特定某側，於更換所有舊螺栓前，發現另有一根螺栓發生斷裂，圖 2 為 3 隻斷裂螺栓及螺帽之外觀。未發生斷裂之螺栓及其配件外觀如圖 3 所示，由一支螺栓、2 個螺帽及 1 片墊片所構成，螺栓直徑為 1.5 英吋。原始設計應為 2 片墊片，然因安裝前發現螺栓長度較原有設計圖要求之尺寸為短，導致於安裝時、靠近螺栓頭側之墊片被捨棄不用。螺栓之材質依照 ASTM A490 Type I，由廠商製作成形、熱處理後，送至下游廠商進行磷酸鹽皮膜處理，再進行後續之安裝。

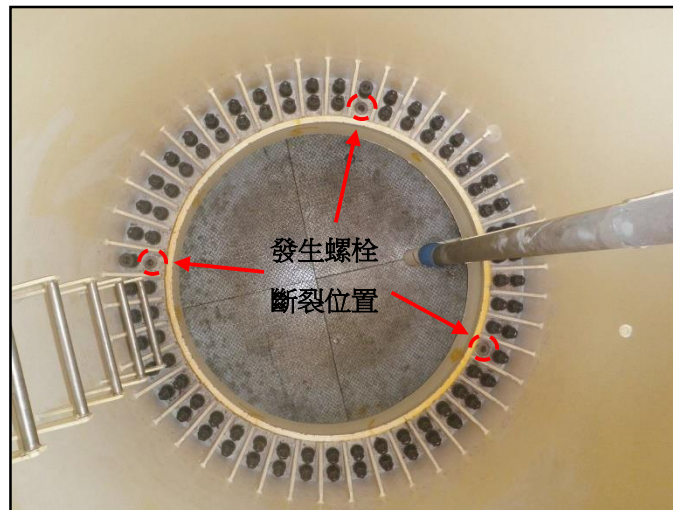


圖 1 海氣象觀測塔塔架本體上段與中段法蘭連接處螺栓斷裂位置外觀。

Figure 1 The location of failed bolts in the flanges connecting upper and middle sections of met mast structure.



圖 2 現場取下斷裂螺栓之外觀及其編號。

Figure 2 Appearances of failed bolts and its corresponded designation.

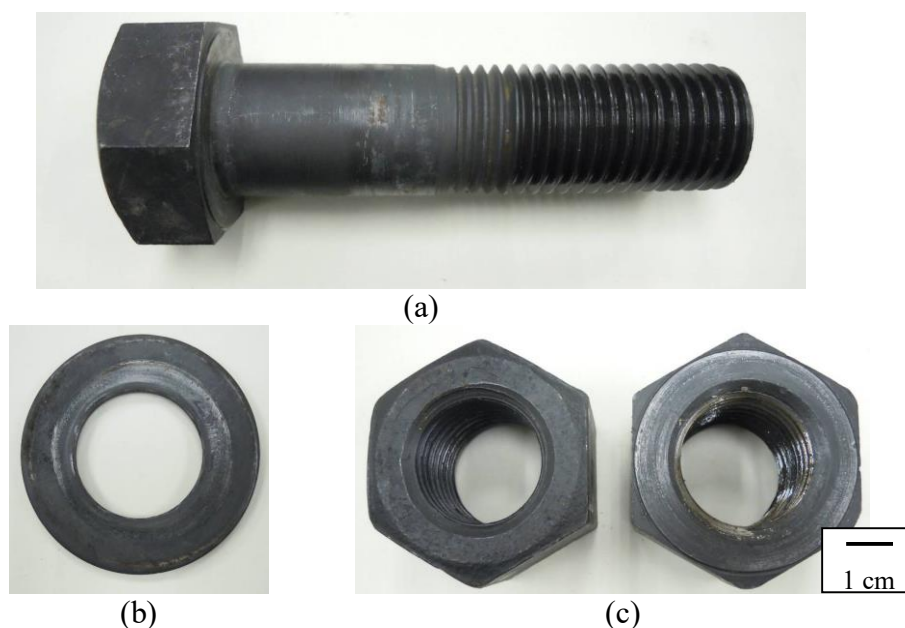


圖 3 螺栓及其配件外觀 (a)螺栓 (b)墊片 (c)螺帽。
Figure 3 Appearances of the bolts and accessories (a)bolt, (b)washer, and (c)nut.

3.2 材質分析與微硬度量測結果

表 1 為編號#2、#3 螺栓之成分分析結果，由結果得知成分均滿足 ASTM A490 Type I 之要求，且與廠商自行送第三方檢測單位之結果十分相近，顯示並無材質誤用的情況發生。另外，亦針對上述二螺栓進行機性量測，由於尺寸過短，遂僅利用微硬度計量測截面上不同位置之硬度值，其結果如表 2 所示。#2 與#3 螺栓之平均硬度值分別為

HRC 41.0 與 41.1，且於截面上不同區域之分布值亦無明顯之差異，雖較規範值之 HRC 39 略高，但差異不大，故大致上可視為材質並無明顯之機性異常之現象發生。圖 4 為#2 及#3 螺栓之 OM 金相觀察結果，兩者均呈現回火麻田散鐵組織，屬於正常之 A490 金相形貌^[2]。由上述材質之分析結果顯示，斷裂螺栓之成分、機械及冶金性質並無明顯異常現象發生。

表 1 螺栓材質成分分析結果。
Table 1 Chemical compositions of the bolts used.

Specimen designation	Standard requirement			Alloying elements consideration[註]					
	C	P	S	Mn	Si	Cu	Al	Cr	Co
#2	0.388	0.015	0.003	0.793	0.210	0.064	0.023	0.851	0.164
#3	0.391	0.014	0.003	0.791	0.210	0.064	0.023	0.851	0.163
廠商分析報告	0.40	0.018	0.003	0.790	0.210	0.055	0.020	0.830	--
ASTM A490 Type I	0.33~0.55	0.045 max.	0.045 max.	(1.65 max.)	(0.60 max.)	(0.60 max.)	(3.99 max.)	(3.99 max.)	--

註：此為規範依據 AISI 建議之其他合金最大添加量

單位：wt%

表 2 螺栓截面微硬度量測結果。

Table2 Microhardness on the cross sectional surface of the bolts.

Specimen designation	近表面←			截面中央							→近表面			平均值
#2	44	44	44	45	41	39	40	35	43	37	44	37	40	41.0 ± 3.2
#3	50	42	40	40	40	40	38	46	37	34	44	47	36	41.1 ± 4.4
ASTM A490	Max. 39													

單位：HRC

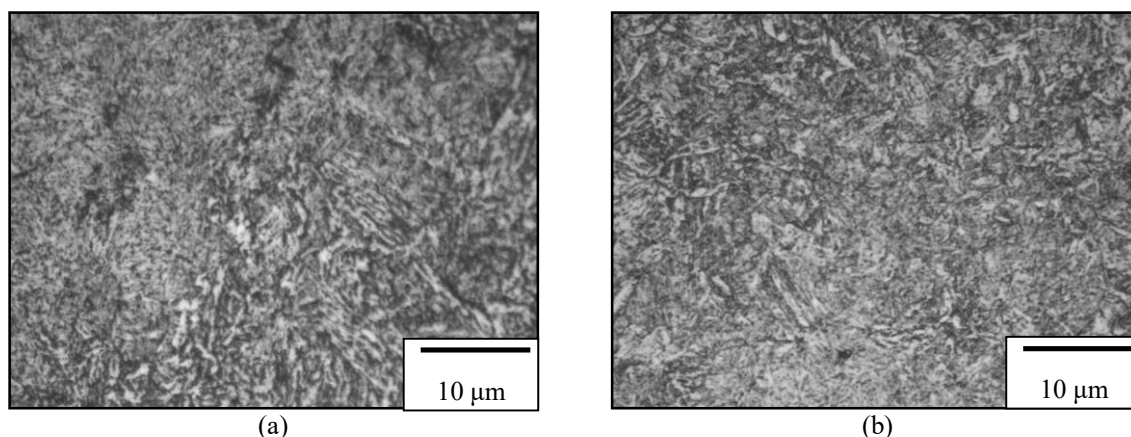


圖 4 不同編號螺栓之金相觀察結果 (a)#2 (b)#3。

Figure 4 Microstructures of different designation bolts (a)#2, (b)#3.

3.3 螺栓表面鍍層分析結果

由廠商告知此螺栓於加工、熱處理程序後，於表面曾施作磷酸鹽皮膜處理，為了確認此製程及其皮膜之厚度，遂擷取螺栓之截面進行近表面處之 SEM 觀察，並利用 EPMA 進行成分分析。一般而言，磷酸鹽皮膜層之組成為磷酸鋅鐵，由圖 5 之分析結果中可明顯觀察到表面為富 Zn、O、P，且 Fe 含量自外表面往內遞減，此即為典型的磷酸鹽皮膜組成，其厚度約為 5~10 μm，另外，於此層中亦可發現有 Al、Si、Cl 等元素富集的現象。雖然此法蘭接頭位於塔架之內部，然此處並非完全封閉之空間，加上測風塔位於外海處，故研判來自外界環境之 Cl 離子或粉塵仍可進入此處，進而附著於螺栓表面之磷酸鹽皮膜上或與其發生反應。

3.4 破斷面觀察與微區成分分析

二支螺栓之斷裂處均位於螺栓之螺帽頭與螺柱之交接處(圖 6(a)、圖 7(a)中紅色箭頭所指處)，另外，於圖中破斷面的下方處均可觀察到金屬色之裸材，且呈現快速破斷之山形紋(圖 6(b)、圖 7(b))，研判下方為最後拉斷之位置，換言之，破斷面上方即為破裂起始之位置。

圖 8(a)為#2 螺栓於螺柱端破斷面觀察，可明顯觀察到上方如下弦月形區域(紅色虛線區域)、中間呈較深色之腐蝕生成物區(黃色虛線區域)，以及下方金屬色裸材區(藍色虛線區域)等三部分。其中，上方之起始區呈現於扭力-扭力或扭力-壓縮狀態下，於高應力集中條件下之疲勞破裂形貌^[3]。進一步擷取圖 8(a)中之白線區域進行 SEM 觀察，如圖 8(b)所示，可觀察到表面覆蓋明顯之腐蝕生成物，分別針對圖中破斷面不同位置進行

EDS 微區成分分析(點 A~D)，結果如圖 9 所示，其中，A、B 二點位於起始之平整破斷區域內，靠近表面之 A 點處之 EDS 分析主要為 O、Fe、C、Cl，另有少量之 Si、Al、P、S 等元素(圖 9(a))，其中，高濃度之 Cl 顯示此處應已明顯受到來自海上環境之腐蝕因子影響，而 Si、Al 等成分應為外界粉塵、砂粒之組成。此外，於 B 點中另可分析到 Zn 元素之存在(圖 9(b))，然於海上環境或螺栓材質中，均無此元素之存在，唯一的可能來源為螺栓表面之磷酸鹽皮膜處理。C 點位於中間呈較深色腐蝕生成物之區域內，EDS 結果中若排除基材原有之 Fe、Cr、Mn 等元素外，僅可偵測到高含量之 O 及少量之 Cl 元素(圖 9(c))，研判主要為材質發生氧化之結果，且並無外界沙塵沈積的現象。D 點乃為呈現金屬原色之區域，其 EDS 結果亦僅分析到材質主要之 Fe、Cr、Mn 等元素(圖 9(d))。由上述分析結果已可確認破斷面上方處為破裂起始位置，屬於疲勞破斷之形貌，另外此區存在著高濃度之 Cl，沙塵之 Si、Al、O 等構成元素，加上中間呈較深色腐蝕生成物之區域，推測破裂型態為腐蝕疲勞；而最後帶有金屬裸材之區域，乃因上述之裂紋傳播後導致螺栓尚存之截面積縮小，因無法承受應力而導致拉斷之結果，故無腐蝕生成物存在。

為了進一步瞭解破裂起始位置之破裂形貌，遂以酸洗方式除去表面之腐蝕生成物，其 SEM 觀察結果如圖 10 所示，由圖 10(a)中白線區域之放大圖中，發現表面出現許多凹洞(圖 10(b))，研判乃應為過度酸洗腐蝕物，而侵蝕到基材所造成，此外，並無觀察到明顯之沿晶破裂之形貌，研判此螺栓並無發生氫誘發延遲而導致破裂起始。圖 11(a)為#3 螺栓於螺柱端破斷面外觀，不同區域之破裂類型與螺栓#2 相似，針對破裂起始處之 E、F 位置進行 SEM 觀察，結果如圖 11(b)所示，再分別針對此二處進行 EDS 微區成分分析，結果如

圖 11(c)、(d)所示。破斷區域靠近表面之 E 點處之 EDS 分析主要為 O、Fe、Cl、Na(圖 11(c))，其中高濃度之 Cl 為來自海上環境之腐蝕因子。而於圖 11(a)中呈現橢圓區域內之 F 點，則可分析到高濃度之 Zn、P、O 元素(圖 11(d))，由此再度證實了先前假設上述元素之來源為螺栓表面之磷酸鹽皮膜處理製程。

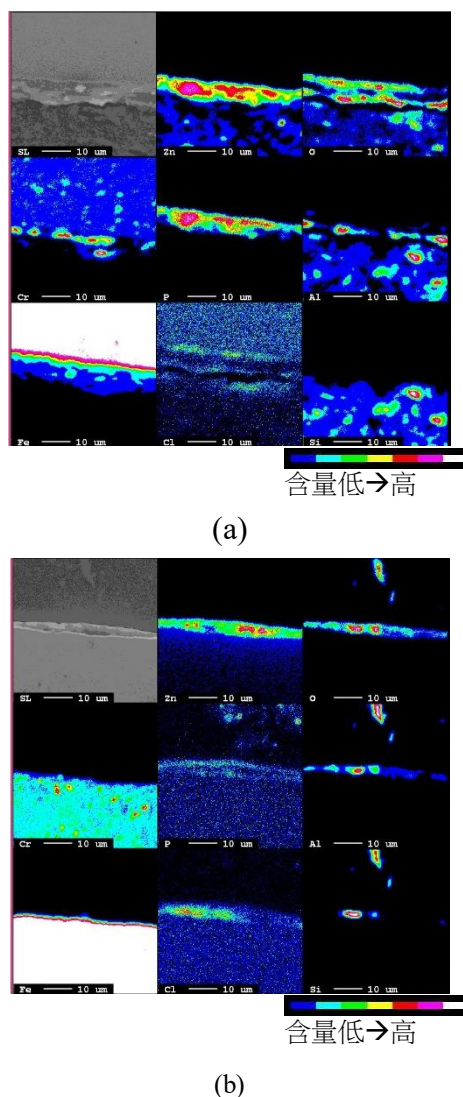


圖 5 不同編號螺栓近表面處之截面 EPMA 成分分析結果 (a)#2 (b)#3。
Figure 5 EPMA mapping results of the cross section near the surface for different designation bolts (a)#2, (b)#3.

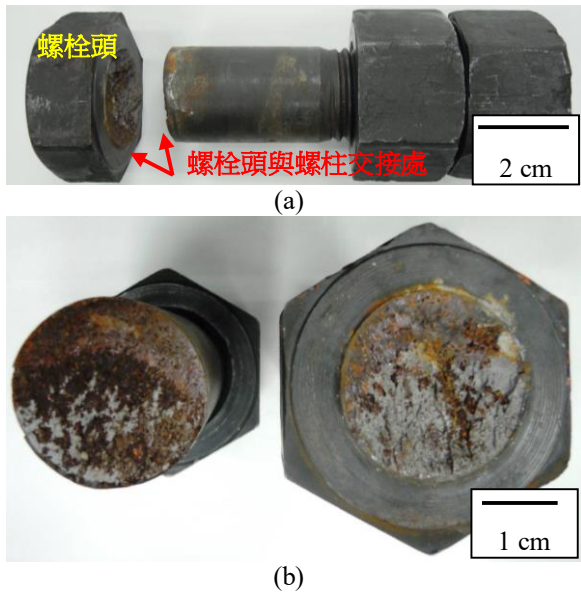


圖 6 編號#2 之斷裂螺栓外觀 (a)側面圖 (b)破斷面上視圖。
Figure 6 Appearances of #2 failed bolt (a)side view, (b)top view.

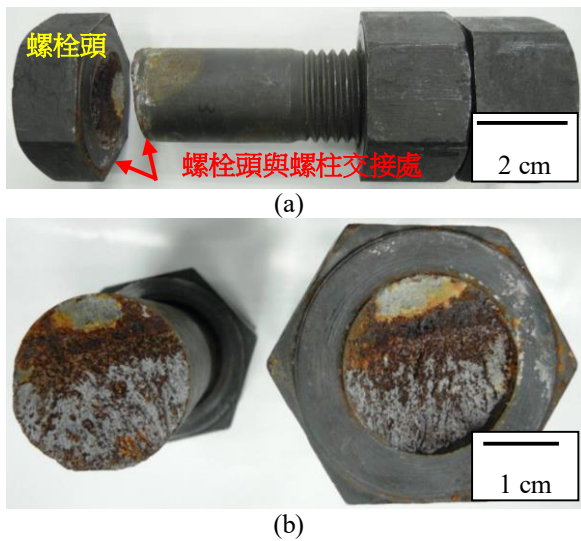


圖 7 編號#3 之斷裂螺栓外觀 (a)側面圖 (b)破斷面上視圖。
Figure 7 Appearances of #3 failed bolt (a)side view, (b)top view.

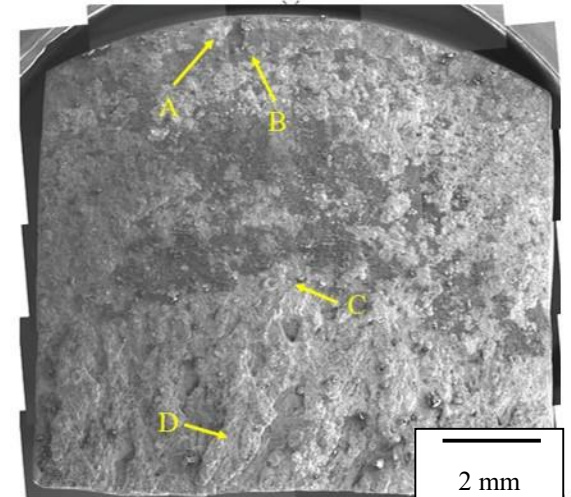
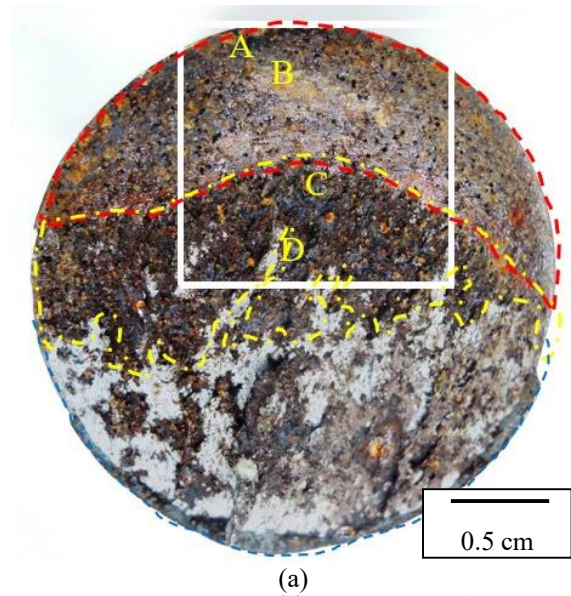


圖 8 編號#2 螺栓之破斷面觀察 (a)巨觀觀察 (b)圖(a)白線區域內之 SEM 觀察結果。
Figure 8 Micrographs of fracture surface for #2 failed bolt (a)digital camera photo, and (b)SEM photo in white-line region of Fig. 8(a).

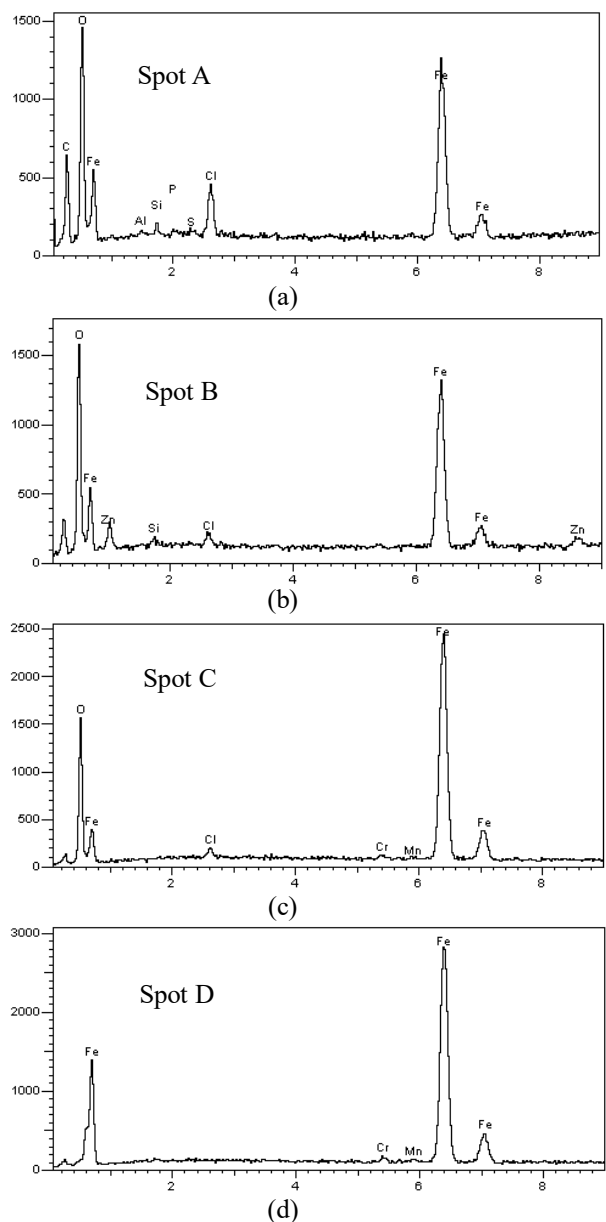


圖 9 圖 8 中編號#2 螺栓破斷面上不同位置處之 EDS 分析結果 (a)位置 A (b)位置 B (c)位置 C (d)位置(d)。
 Figure 9 EDS analysis results of different spots on the fracture surface of #2 failed bolt (a)spot A, (b)spot B, (c)spot C, and(d)spot D.

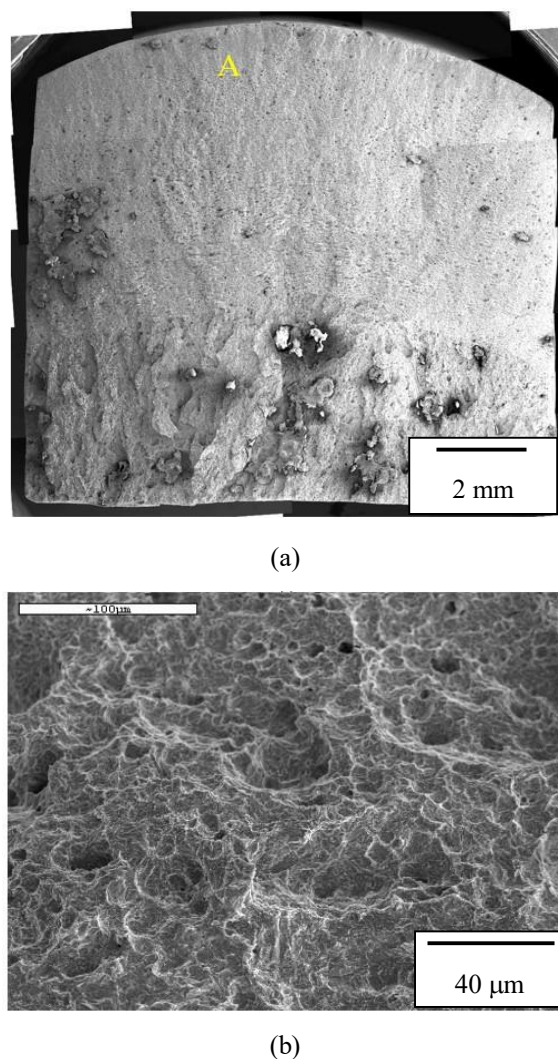


圖 10 編號#2 螺栓破斷面經酸洗去除表面腐蝕物後之 SEM 照片 (a)全貌 (b)圖(a)中 A 點之較大倍率觀察結果。
 Figure 10 SEM photos of #2 failed bolt fracture surface following de-scaling process (a)whole view (b)higher magnitude in spot A.

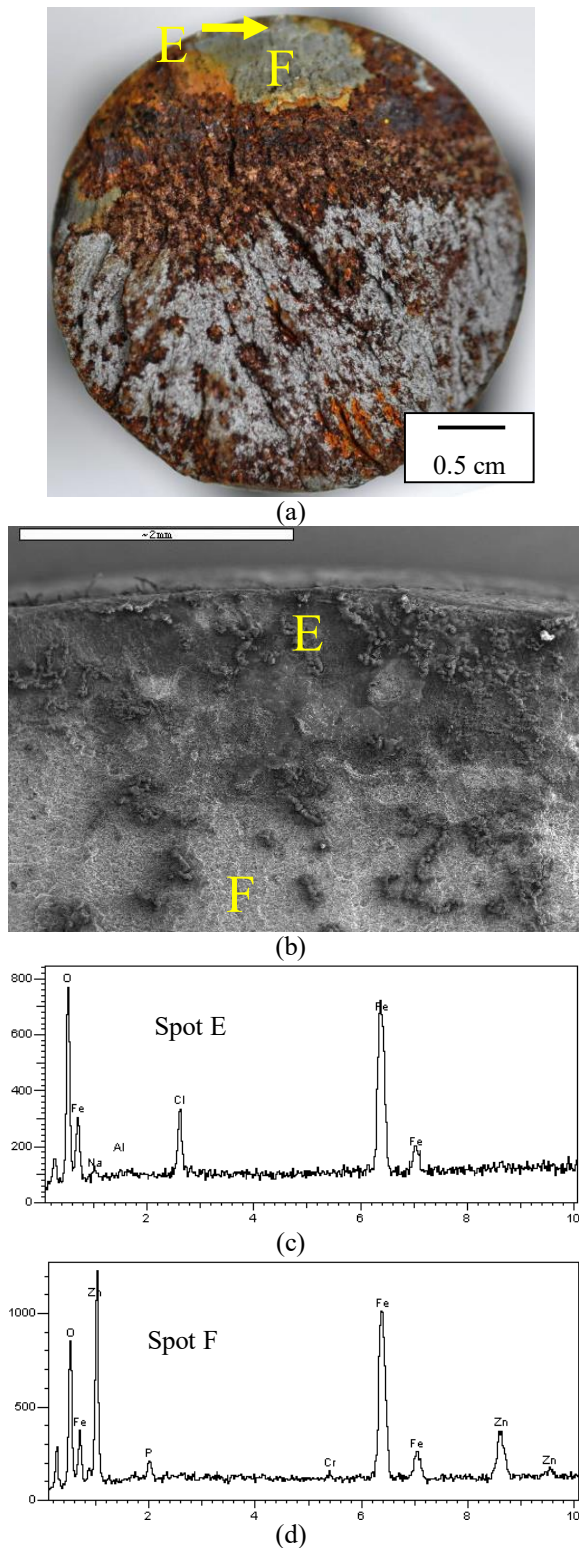


圖 11 編號#3 螺栓之(a)破斷面觀察、(b)SEM 觀察及(c)E 點與(d)F 點之 EDS 分析結果。

Figure 11 (a)Fracture surface observation (b)SEM photo, EDS analysis in (c)spot E and (d)spot F for #3 failed bolt.

3.5 綜合討論

由上述分析結果顯示，螺栓之材質成分與機械性符合規範要求，且並無冶金組織異常或劣化之現象發生。破斷面之起始區域乃呈現於扭力-扭力或扭力-壓縮狀態下，於高應力集中條件之疲勞破裂形貌，另伴隨明顯的腐蝕發生，屬於腐蝕疲勞型態，此類破裂形貌常出現於高強度螺栓中。此外，於破斷面上之局部區域可偵測到高濃度之 Zn、P 等元素，而此元素並不存在於材質本身與外界環境中，故合理推測螺栓於製作後、於未施作表面皮膜處理前已發生裂縫，導致於進行磷酸鹽皮膜處理時，Zn、P 等元素滲入裂縫鍍於破斷表面上。於螺栓鎖固完成後，此裂縫處即成為應力集中點，此時，螺栓於承受來自鎖固之扭力與外界風力之反覆應力下，加上來自海上環境之腐蝕性 Cl 離子侵入，而造成此區發生腐蝕疲勞現象。隨著裂縫持續傳播，當剩餘之截面積無法承受外界之應力時，最終導致裂縫快速傳播而斷裂之結果。雖於安裝前發現螺栓長度較原有設計圖要求之尺寸為短，導致於安裝時、靠近螺栓頭側之墊片被捨棄不用，此舉可能導致螺栓頭與鋼板間無法完全緊固密合，而導致外界之腐蝕因子可能藉由間隙滲入此處，然單純因腐蝕造成之裂縫起始需要較長之孕核時間，於本案中並非造成短時間發生無預警斷裂之主要原因。

4. 結論與改善對策

此案之破裂主因乃因螺栓於製造時即有裂縫產生，此應力集中處乃成為後續腐蝕疲勞發生之起始位置，屬於加工不當或製程瑕疵。然無法得知廠商之確切製程，無法進一步推斷安裝前即發生裂縫的真正原因。由於新更換之螺栓於安裝前已經過 100%之 NDT 全檢，故應無短時間發生異常斷裂之疑慮，但對於已換下之舊有螺栓，仍建議應提高 NDT 檢測比率，以確認此批螺栓之品質

及造成瑕疵的可能原因，並有助於對後續之螺栓
供應商進行品質管控。

參考文獻

- [1] 李珣琮（台灣經濟研究院再生能源辦公室主任），離岸風電大解密：三階段推動，2025接軌國際，取自 <https://energymagazine.itri.org.tw/Cont.aspx?ContID=2&ContID=2938>。
- [2] Salim Brhimi Eng., An investigation PER IFI-144, “Qualification of DACROMET for use with ASTM A490 high-strength structural bolts”, IBECA technologies Corp. Montreal, Quebec, Canada, 2006.
- [3] Donald J. Wulpi, in: Understanding How Components Fail, 2nd Edition (ASM International, 2013) Chapter 10 Fatigue Fracture.