



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).0003

風力機螺栓破損分析(F04) Failure Analysis of Bolts of Wind Turbine (F04)

莊方慈*¹、鄭錦榮²、翁維亨²

Fang-Tzu Chuang*¹, Jiin-Rong Cheng², Wei-Heng Wong²

中文摘要

本文針對 JIS B1051 10.9 及 12.9 系列風力機破損螺栓從外觀目視檢視、破斷面微觀組織、材料元素成份及腐蝕物分析等多方面探討風力機螺栓破損原因。結果顯示 10.9 及 12.9 系列螺栓斷裂面皆為延性斷裂(凹槽狀)，成份以鐵 Fe、碳 C 為主，另發現微量硫 S(0.33 at.%)存在；因無過多的腐蝕硫 S 元素，故推論螺栓的破壞斷裂是由於外應力大於螺栓的降伏強度而導致螺栓斷損。

關鍵詞：破損分析、腐蝕、降伏強度。

Abstract

In this study, the damage of bolts of wind turbine is discussed from the aspects of visual inspection, microstructure of fracture surface, material composition and corrosive analysis of JIS B1051 10.9 and 12.9 series of wind turbine. The results show that 10.9 and 12.9 series of bolt fracture surface are ductile fracture (dimple), and composed majority of iron (Fe), carbon (C) and minority of sulfur S (0.33 at.%). In fact, there is no excessive amount of corrosive sulfur (S) element, so the bolt damage from the fracture surface could be inferred that the external stress, which was greater than the yield strength of the bolt.

Keywords: Failure Analysis; Corrosion; Yield Strength.

收到日期：106 年 08 月 15 日

修訂日期：108 年 05 月 13 日

接受日期：109 年 03 月 25 日

¹ 核能研究所

¹ Institute of Nuclear Energy Research

² 台灣電力公司綜合研究所

² Taiwan Power Research Institute.

*聯絡作者：fangtzu.chuang@gmail.com

1. 前言

2008 年薔蜜颱風造成台電公司部分風機塔座內部螺栓損壞，導致風機受損無法發電，初步判斷為風機葉片剎車失靈，即迎風轉向機構先遭受強風破壞而故障，導致機艙無法順利迎風而使葉片受側風影響，葉片旋角機構制動力矩無法維持固定角度，機艙被推至背風位置，接著葉片旋角系統亦遭破壞，故葉片旋角被推至工作角度而轉動；然而在強大風速作用下，使得風機葉片高速旋轉的推力形成巨大力矩施於塔架，導致原 JIS B1051 10.9 系列的螺栓應力大於降伏強度而損壞。圖 1 為風力機基本構造及螺栓示意圖，在當時的事故檢討報告^[1]指出，有關螺栓的材料分析部份，已建議用較高降伏強度值(1040 MPa)、抗拉強度值(1470 MPa)的 JIS B1051 12.9 系列螺栓取代原本降伏強度值(940 MPa)、抗拉強度值(1350 MPa)的 JIS B1051 10.9。2015 年蘇迪勒颱風來襲，仍造成已更換螺栓的風機塔座螺栓損壞，故再針對 10.9 及 12.9 系列螺栓從外觀目視檢視、破斷面微觀組織、材料元素成份及腐蝕物分析等多方面探討風力機螺栓破損原因，確認是否有其它特別破壞原因。

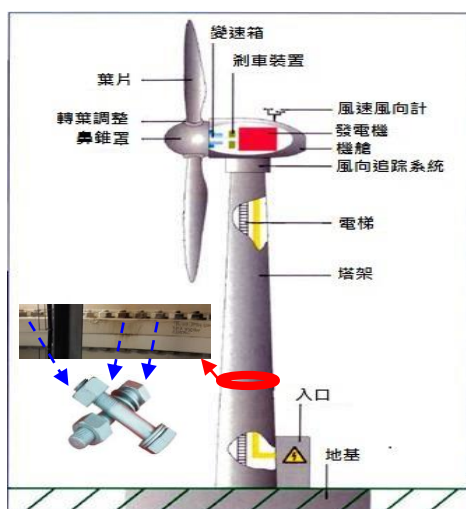


圖 1 風力機基本構造及螺栓示意圖。
Figure 1 The fundamental structure and bolt of wind turbine.

2. 實驗方法

2.1 表面目視檢查

本研究先以目視檢視來記錄螺栓斷面，並將螺栓斷口定義：斷裂起源區(A 區)、裂紋成長區(B 區)、最終拉斷區(C 區)，在拍照後再以保留螺栓斷裂表面的方式，對 JIS B1051 10.9 及 12.9 系列破損螺栓作機械加工切割成直徑約 3 公分、厚度約 1 公分的薄片，再浸入丙酮作超音波震盪清洗，以去除表面被覆的雜質及油污，最後再次目視檢查與拍照紀錄。

2.2 破斷面微觀組織分析

實驗使用之掃描式電子顯微鏡(SEM)型號為 Hitachi S-4800 進行微觀組織觀察，加速電壓 15 kV，主要利用二次電子(Secondary Electron)觀察表面形貌與破壞分析，並鑑定螺栓之破裂起始點與方向；另觀察斷裂起源區(A 區)、裂紋成長區(B 區)、最終拉斷區(C 區)的微觀組織，來判斷螺栓的破裂形態。

2.3 材料元素成份及腐蝕物分析

本實驗使用能量色散 X-射線光譜(EDS)，型號為 XFlash Detector 5010，加速電壓 15 kV，試片電流 10 uA，對樣品進行化學元素定性分析(Qualitative Analysis)，用來鑑定螺栓之斷裂起源區(A 區)、裂紋成長區(B 區)、最終拉斷區(C 區)的化學元素成份，來判斷螺栓的破裂是否為過多的腐蝕硫(S)元素所造成。

3. 結果與討論

3.1 表面目視檢查

圖 2(a)為 JIS B1051 10.9 系列的螺栓斷口，可明顯區分螺栓上方邊緣為斷裂起源區(A1 區)，中間區域的裂紋成長區(B1 區)，及螺栓下方的最終拉斷區(C1 區) 從斷裂起源區(A1 區)上方邊緣 O1

處至最終拉斷區(C1 區)，可發現有放射方向性裂紋形成，而在最終拉斷區與平坦斷面呈傾斜角約 35°，此最終拉斷面涵蓋約 1 個螺牙高度。另在巨觀表面目視檢查部份，首先檢視螺栓上方斷裂起源區(A1 區)是否有貝殼紋(clamshells)存在，因若發生腐蝕情形，則會由不同腐蝕速率而形成顏色不一的前緣(front)，進而引起貝殼紋的形成^[2]，可觀察到此區未發現貝殼紋的形成，故可初步判斷可能非腐蝕造成的初始斷裂。接著在後裂紋成長

區(B1 區)上方觀察，可發現標示 T 之巨觀破壞形貌，此為撕裂造成之撕裂脊(Tearing ridges)，為不同裂紋交接台面(step)及/或過載(over-stress)之結果，如圖 2(b)所示。故此現象可能在各方向裂紋剛開始成長時，所互相影響所造成；而在裂紋成長區(B1 區)下方主要為裂紋成長造成之漣漪紋(ripples)，漣漪紋意味斷面除承受單向張應力作用外，亦有來自單向彎曲應力及/或扭矩之效應，如圖 2(c)所示^[3-4]。

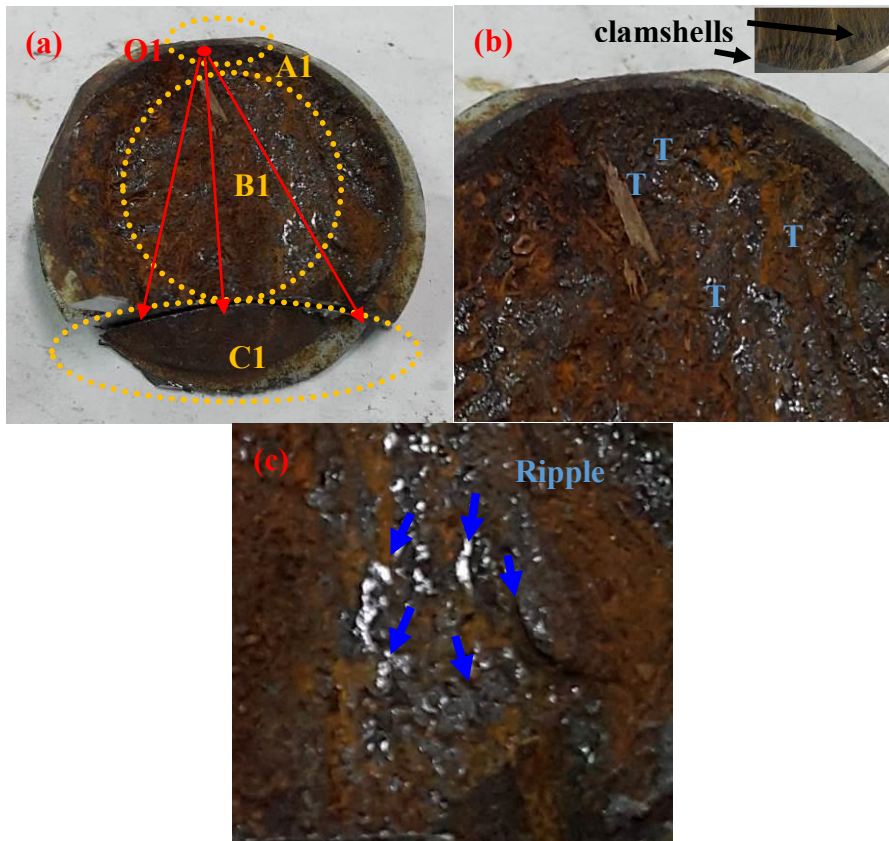


圖 2 (a)JIS B1051 10.9 系列的螺栓斷口，(b) A1 區無因腐蝕而產生的貝殼紋(clamshells)，B1 區上方 T 為撕裂造成之撕裂脊(Tearing ridges)之巨觀破壞形貌，(c) B1 區下方裂紋成長造成之漣漪紋(ripples)。

Figure 2 (a) JIS B1051 10.9 series of bolt fracture, (b) no clamshells due to corrosion were discovered in A1 area, and the T is the tearing ridge of the giant destruction of the topography in the top B1 area, (c) the crack growth caused by ripple pattern (ripples) in the bottom B1 area.

圖 3(a)為 JIS B1051 12.9 系列的螺栓斷口，亦先區分從螺栓上方邊緣為斷裂起源區(A2 區)，中間區域的裂紋成長區(B2 區)，以及螺栓下方的最

終拉斷區(C2 區)；與 10.9 系列螺栓相似，可發現從斷裂起源區(A2 區)上方邊緣 O2 處至最終拉斷區(C2 區)有放射方向性裂紋形成，但在最終拉斷

區與平坦斷面呈現較大的傾斜角約 65° ，其最終拉斷面涵蓋約 2 個螺牙高度，相較 10.9 系列螺栓的最終拉斷情形，12.9 系列斷裂面的傾角較大且劇烈。而在巨觀表面目視檢查部份，與 10.9 系列螺栓斷裂情形相似，於螺栓上方斷裂起源區(A2 區)並無貝殼紋(clamshells)存在，這代表 12.9 系列的螺栓的初始斷裂可能亦非腐蝕造成。接著在裂紋成長區(B2 區)的觀察，僅發現裂紋成長造成之漣漪紋(ripples)而無撕裂脊(Tearing ridges) 如圖 3(b)

所示；另外，在裂紋成長區(B2 區)與最終拉斷區(C2 區)的兩側區(D2)屬於最終失穩斷面，從圖 3(c)可發現 12.9 系列螺栓的螺旋狀龜裂漣漪軌跡十分明顯，應為扭矩作用下之結果，故可推論 12.9 系列螺栓的降伏強度及抗拉強度雖較 10.9 系列螺栓高，但因延展性相對較差，若當外應力超過該螺栓的降伏強度及抗拉強度值時，有可能 12.9 系列螺栓會較 10.9 系列螺栓更快劇烈及完全斷裂^[3-4]

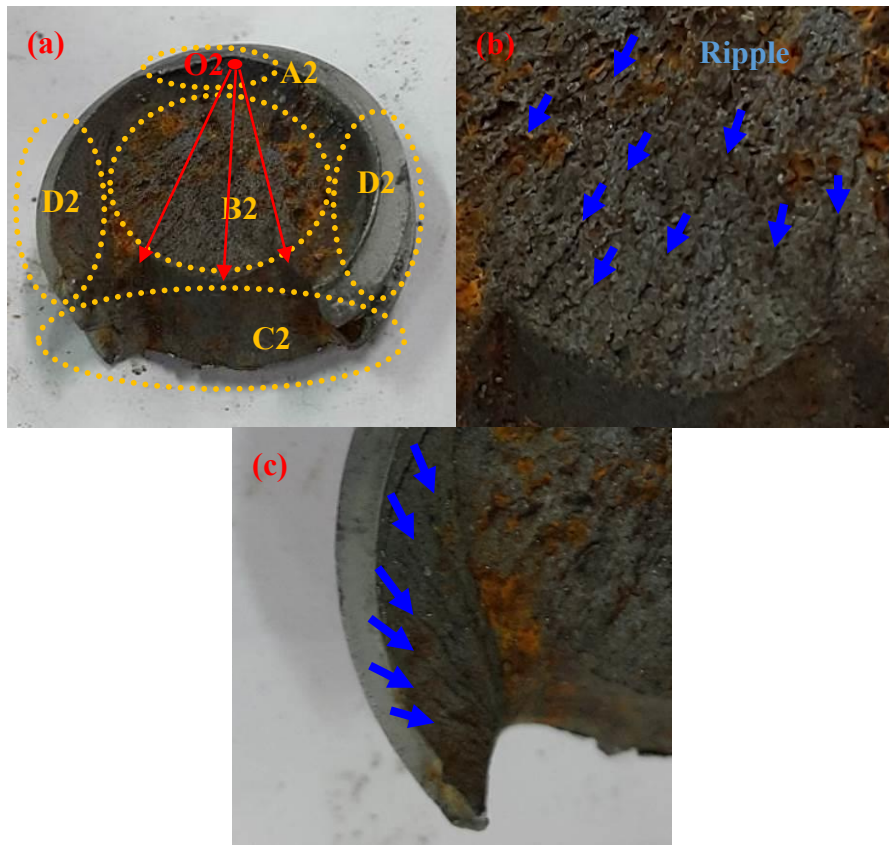


圖 3 (a)JIS B1051 12.9 系列的螺栓斷口，(b) B2 區僅下方有裂紋成長造成之漣漪紋(ripples)，(c) D2 區為扭矩作用下之螺旋狀龜裂漣漪軌跡。

Figure 3 (a) JIS B1051 12.9 series of bolt fracture, (b) the crack growth only caused by ripple pattern (ripples) in the bottom B2 area, (c) the spiral cracked ripple is found in D2 area by the torque.

3.2 破斷面微觀組織分析

圖 4(a)為 10.9 系列螺栓斷口全貌，而圖 4(b)則為螺栓斷口上方邊緣的斷裂起源區(A1 區)SEM 圖，由於螺栓受力狀態主要為颱風所造成的外加力矩形態，故在觀察 10.9 系列螺栓外觀無明顯外

部造成的缺陷後，可推論其破裂起始點應發生於最終拉斷區(C1 區)之相對方向；而在 A1 區域靠近斷口外側邊緣約 $50\mu\text{m}$ 的 O1 點附近，除了顯示出平整之凹槽形狀(dimple)的延性斷裂面外，亦發現 dimple 破壞的斷裂紋，故推測此 O1 點附近可

能為裂紋起始處，也是螺栓因過載應力超過降伏強度的證據。然而在裂紋成長區(B1 區)SEM圖 4(c)中，相對於斷裂起源區(A1 區)，此區域更顯示出高低不平的凹槽形狀(dimple)延性斷裂面，其均勻的凹口直徑分佈約 300 nm，但無 dimple 破壞的斷裂紋，故此區域應僅為裂紋持續成長所造成。10.9 系列螺栓本身延性較佳，dimple 分佈較廣且高低不平。最後在最終拉斷區(C1 區)的觀察如圖 4(d)，此區域亦以 dimple 的延性斷裂面為主，但後期因剩餘截面積不足所造成的快速斷裂，所以可能會造成相對裂紋成長區(B1 區)有較大凹口直徑的 dimple 形態，其均勻的直徑分佈約 1 μ m^[4]。

圖 5(a)為 12.9 系列螺栓全貌，相似於 10.9 系列螺栓為受颱風所造成的外加力矩的破壞情形，然而在 12.9 系列螺栓本身外觀無明顯外部的缺陷下，故亦可以推測其破裂起始點應發生於最終拉斷區(C2 區)之相對方向；然而在 A2 區域靠近斷口外側邊緣約 90 μ m 的 O2 點附近，從圖 5(b)SEM 中可發現出反覆擠壓面形成的磨損痕跡(abrasion marks)，除了上面有方向一致的平行條紋外，亦發現有朝向最終拉斷區的方向性破壞的斷裂紋，故推測此 O2 點附近可能為裂紋起始處，也是螺栓因過載應力超過降伏強度的證據。因在此區域較無 dimple 存在，可能是因為 12.9 系列螺栓較 10.9 系列螺栓有較高降伏強度、抗拉強度，但相對延性較低，故較無 dimple 的產生。然而在 12.9 系列螺栓裂紋成長區(B2 區)的 SEM 圖 5(c)中，可發現不同於 10.9 系列螺栓裂紋成長區(B1 區)之凹口直徑大小均勻的 dimple，此區多為大小不均勻且直

徑大小約 500 nm~ 3 μ m 的 dimple，有可能是 12.9 系列螺栓本身材料含較多不同元素，故在材料機械性質較不一致下所造成。最後在最終拉斷區(C2 區)的觀察如圖 5(d)，此區域 dimple 的延性斷裂面可能也是因剩餘截面積不足而快速斷裂，所以 dimple 的形態相對 B2 區更不明顯^[4]。

3.3 材料元素成份及腐蝕物分析

圖 6(a)~(c)為 10.9 系列螺栓斷裂起源區(A1 區)圖 4(b)、裂紋成長區(B1 區)圖 4(c)、最終拉斷區(C1 區)圖 4(d)的材料元素成份定性分析。10.9 系列螺栓主要合金元素以 Fe 含量約 5.94~10.45 at.% 和 C 含量約 14.12~16.67 at.% 為主，而其他合金元素則為 Na 含量約 0.46~3.83 at.%；其中值得注意的是在最終拉斷區(C1 區)發現腐蝕元素 S 含量約 0.33 at.%，但因所發現的量十分小，且不在螺栓斷裂起源區(A1 區)，故推論應不是腐蝕元素 S 造成螺栓初始斷裂的發生。

圖 7(a)~(c)為 12.9 系列螺栓斷裂起源區(A2 區)圖 5(b)、裂紋成長區(B2 區)圖 5(c)、最終拉斷區(C2 區)圖 5(d)的材料元素成份定性分析。12.9 系列螺栓相較於 10.9 系列螺栓含有更多合金元素，在 12.9 系列螺栓主要合金元素以 Fe 含量約 32.64~41.21 at.% 和 C 含量約 34.58~38.58 at.% 為主，而其他的微量合金元素則包括 Na、Si、Ca、Zr、Cr、Al、Zn...等，其含量範圍約 0.4~1.81 at.%；因在螺栓斷裂起源區(A2 區)未發現腐蝕元素 S 或 Cl 的存在，故推論應不是腐蝕因素而造成螺栓的初始斷裂發生。

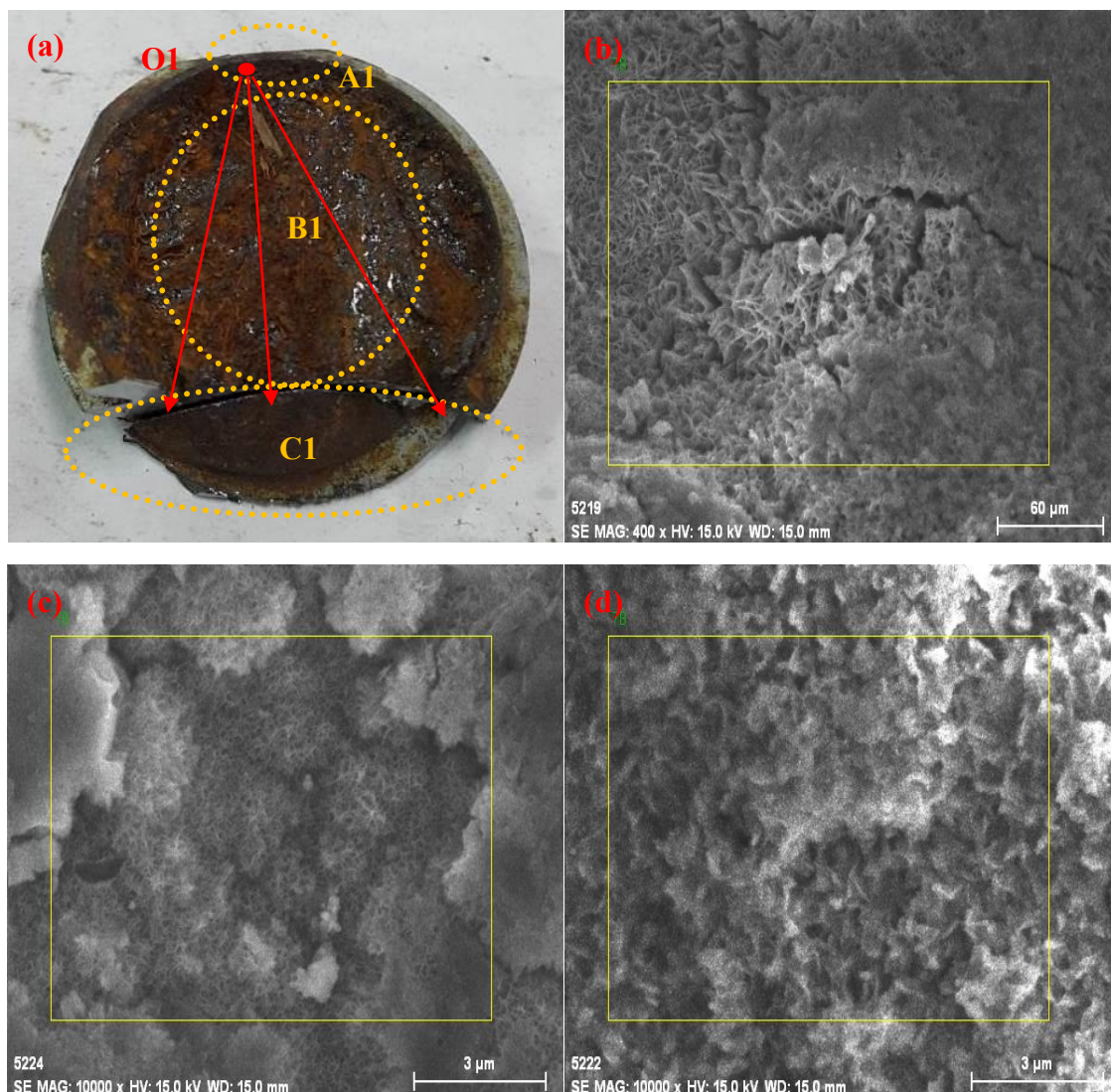


圖 4 (a) JIS B1051 10.9 系列螺栓斷口全貌，(b) A1 區邊緣約 50 μm 的 O1 點附近，凹槽形狀(dimple)延性斷裂面及 dimple 破壞裂紋，(c) B1 區 dimple(凹口直徑約 300 nm)比 A1 區 dimple 相對有較大的高低起伏，(d) C1 區 dimple(凹口直徑約 1 μm)比 B1 區 dimple 凹口直徑相對較大。

Figure 4 (a) the plain view of JIS B1051 10.9 series of bolt fracture, (b) A1 area near the edge of O1 about 50 μm shows the dimples due to ductile fracture surface and the crack of dimples, (c) dimples (Diameter~300 nm) in B1 area are relatively large ups and downs than in A1 area, (d) the diameter in C1 area (about 1 μm diameter) is relatively large than B1 area.

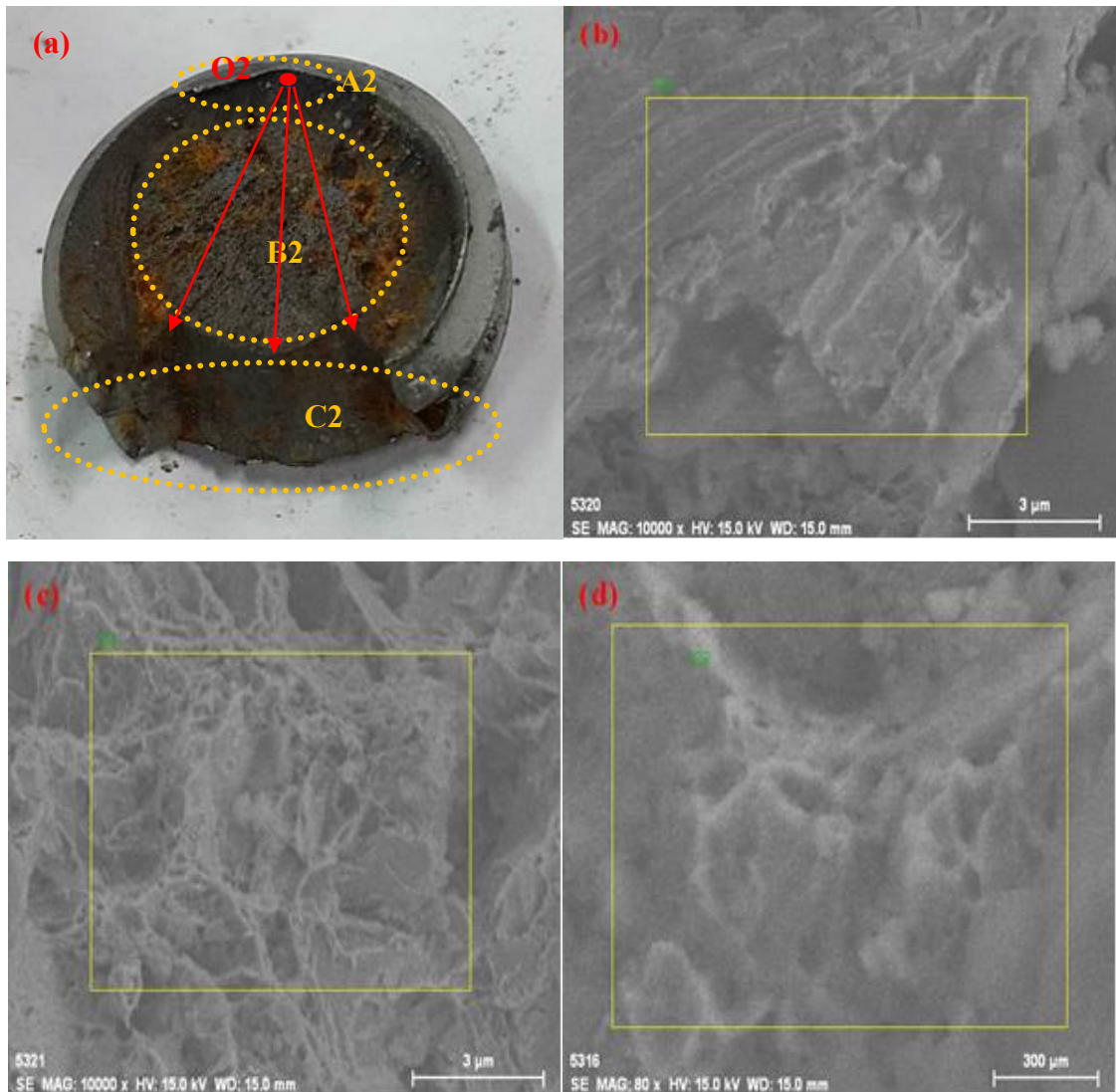
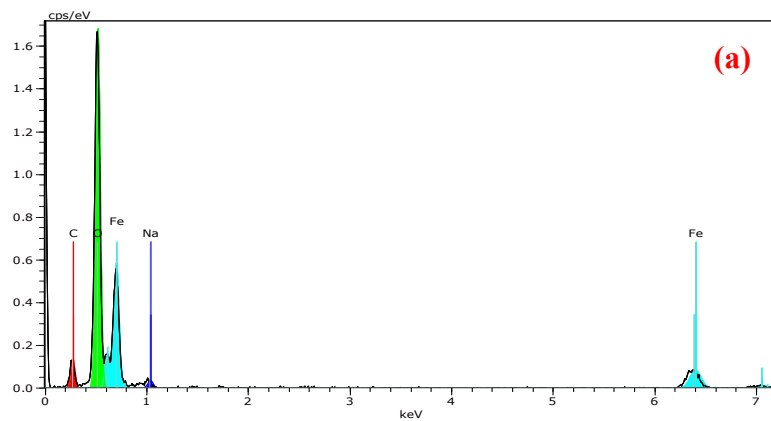


圖 5 (a) JIS B1051 12.9 系列螺栓斷口全貌，(b) A2 區邊緣約 90 μm 的 O2 點附近，反覆擠壓的磨損痕跡(abrasion marks)及破壞的裂紋，(c) B2 區為凹口直徑約 300 nm~ 3 μm 的 dimple，(d) C2 區 dimple 比 B2 區 dimple 的形態相較不明顯。

Figure 5 (a) the plain view of JIS B1051 12.9 series of bolt fracture, (b) A2 area near the edge of O2 about 90 μm shows repeated abrasion marks (abrasion marks) and broken cracks, (c) dimples with a diameter are about 300 nm ~ 3 μm in B2 area, (d) C2 area dimples are not as obvious as B2 area dimples.



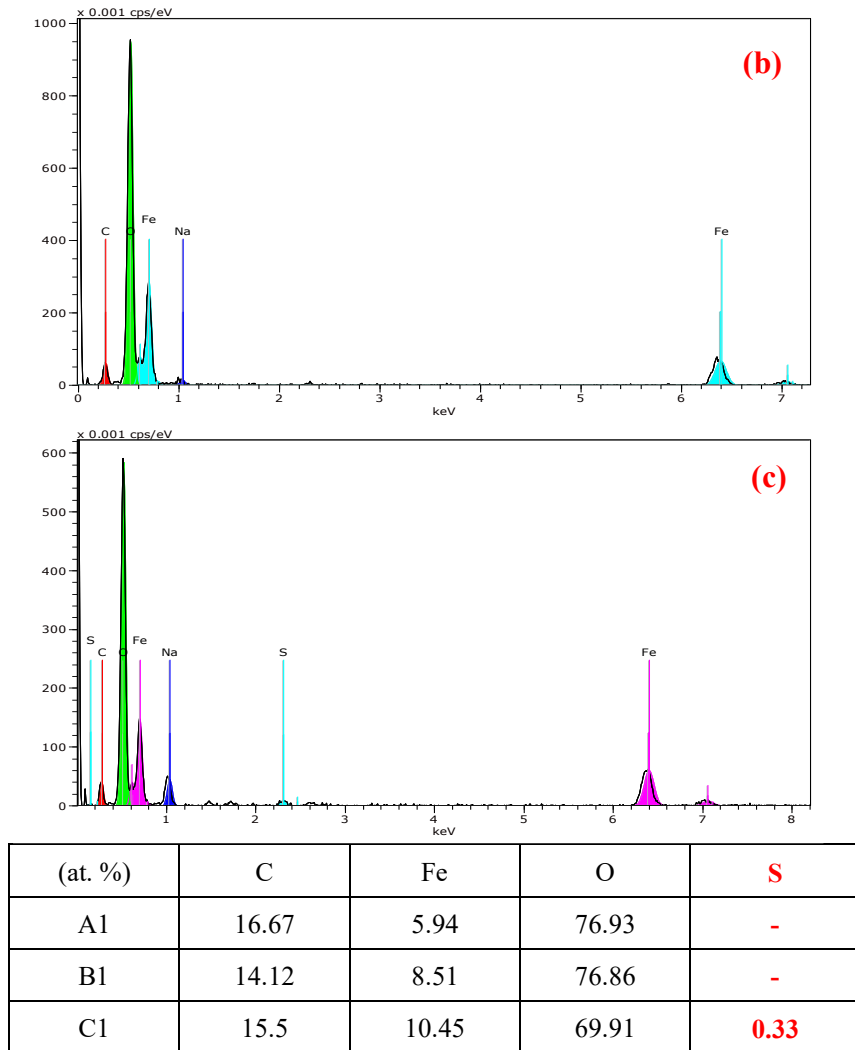
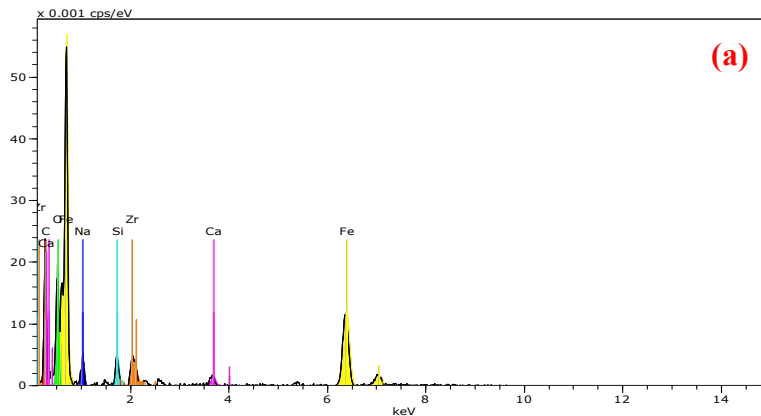
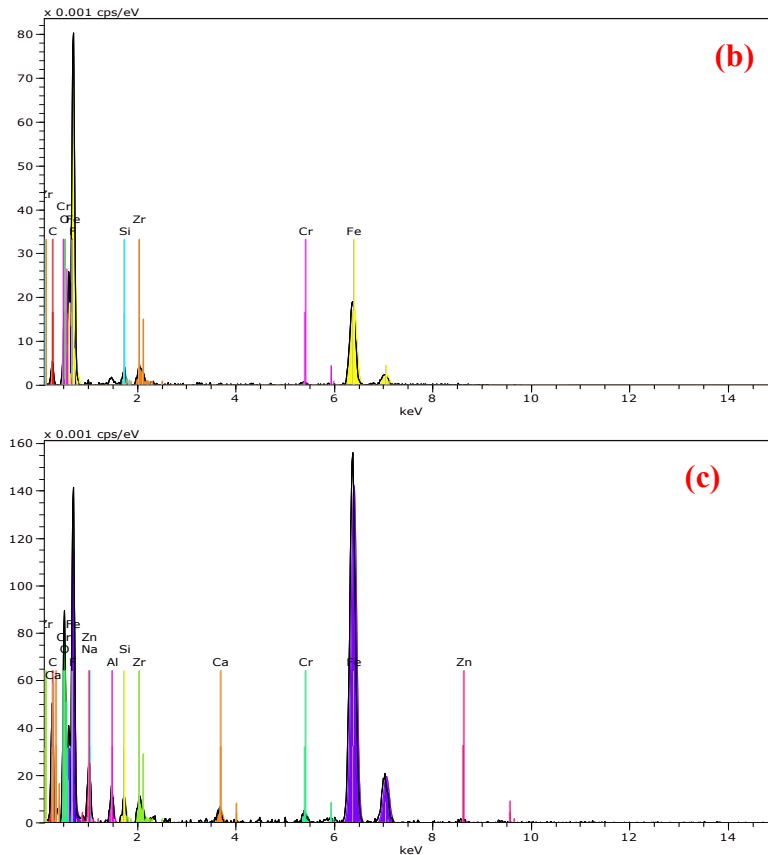


圖 6 10.9 系列螺栓斷裂(a)起源區(A1 區)、(b)裂紋成長區(B1 區)、(c)最終拉斷區(C1 區)材料元素成份定性分析，合金元素以 Fe、C 為主，另含微量 Na，在 C1 區發現微量腐蝕元素 S 含量約 0.33 at.%。

Figure 6 qualitative analysis of the elements of the material in bolt (a) breaking area (A1), (b) crack growth area (B1), and (c) final pull-off area (C1) in 10.9 series bolt. Also, Fe and C are the major component and the other minor Na in alloy, and there is a very small amount of corrosive element S content of about 0.33 at.% found in the C1.





(at. %)	C	Fe	Na	Si	Ca	Zr	Cr	Al	Zn	O
A2	34.58	32.64	1.81	1.11	0.52	0.97	-	-	-	28.37
B2	38.47	41.21	-	1.08	-	1.24	0.40	-	-	17.60
C2	38.58	37.72	0.60	0.73	0.51	0.54	0.52	1.04	0.67	19.09

圖 7 12.9 系列螺栓斷裂(a)起源區(A2 區)、(b)裂紋成長區(B2 區)、(c)最終拉斷區(C2 區)材料元素成份定性分析，合金元素以 Fe、C 為主，另含微量 Na、Si、Ca、Zr、Cr、Al、Zn...等。

Figure 7 qualitative analysis of the elements of the material in bolt (a) breaking area (A2), (b) crack growth area (B2), and (c) final pull-off area (C2) in 12.9 series bolt. Also, Fe and C are the major component and the other minor Na, Si, Ca, Zr, Cr, Al, and Zn in alloy.

4. 結論

- (1) 10.9、12.9 螺栓斷裂外觀目視檢查分析結果，其斷裂起始源及方向包括斷裂起源區(A1、A2 區)、裂紋成長區(B1、B2 區)、最終拉斷區(C1、C2 區)，而在 A1、A2 未發現因腐蝕而產生的貝殼紋(clamshells)，推斷可能非腐蝕造成的初始斷裂。
- (2) 在破斷面微觀組織 SEM 圖觀察，斷裂面主要

以延性斷裂-凹槽形狀(dimple)為主。在 10.9 螺栓的斷口外側邊緣 O1 點附近，可以發現 dimple 結構及 dimple 破壞的斷裂紋，而 12.9 螺栓在斷口外側邊緣 O2 點附近發現反覆擠壓面的磨損痕跡(abrasion marks)所造成斷裂紋。上述兩者皆是螺栓因過載應力超過降伏強度，螺栓主因為外加應力大於降伏強度而斷裂。

- (3) 在材料元素成份及腐蝕物分析部份，雖在 10.9

螺栓的最終拉斷區(C1 區)發現含量約 0.33 at.%腐蝕元素 S，但因含量十分小，且不在螺栓斷裂起源區(A1 區)，判斷應不是腐蝕元素 S 所造成螺栓的初始斷裂發生。

- (4) 12.9 螺栓較原 10.9 螺栓(已符合 IEC-61400 class 2B 規範)具更高降伏強度值(1040 MPa)、抗拉強度值(1470 MPa)，而其再斷裂關鍵應為外加應力大於降伏強度所致。

參考文獻

- [1] “蘇迪勒颱風台電風力發電機組受損事故調查報告”，台灣電力公司報告，2015。
- [2] Howard E. Boyer, in:Metals Handbook : Fractography and Atlas of Fractographs Volume 9(American Society for Metals US, 1974) p.29.
- [3] 陳永增、鄧惠源，in” 機械材料實驗”，高立圖書(台灣，台北，2013) p.90
- [4] William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch (原著)，林貞君、林旻澐(編譯)，in” 材料科學與工程導論”，高立圖書(台灣，台北，2016) p.282.