

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



利用導電性監測複材膠合接口濕熱老化

Monitoring hygrothermal aging in single lap joints of
CFRP by conductivity

王俊凱

Chun-Kai Wang

指導教授：單秋成 博士

Advisor: Chow-Shing Shin, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023

致謝



首先感謝我的指導老師 單秋成教授，謝謝您總是在我面對問題時能夠為我解惑，無論是在實驗架構上所碰到的問題，或是數據分析時，都能夠適時的指引我，往對的方向前進。並且讓我有非常大的自由度，能夠發揮我所學。

感謝亮維學長，在碩一時能夠細心的帶我做實驗，實驗上遇到任何問題時都能夠提出來探討，並找到最好的方式。感謝日昌學長，帶我吃遍 118 巷美食，也能夠彼此分享未來職涯選擇及人生規劃。感謝康祐，硬體設備上架構設計，實驗上該注意的是事情，都能夠與你一起探討。感謝順亘，迅速地掌握所有實驗過程，並且討論出更好的方法。感謝實驗室歆宇學姊、曼薇學姊、立揚學長、芊邑、崇榮、孟宸、維傑。還有西螺農工的蔡明勳主任，主任是我求學階段，最重要的師長，無論是在課程上的用心教學，或是做人處事的開導，都由衷感謝他。

最後感謝我的家人，能夠提供資源，讓我在台北求學六年，無後顧之憂，接下來即將畢業求職了，也是能夠報答的時候了。感謝我的女朋友艾蓉，可以跟我到處旅行，及適時的給予鼓勵，紓解實驗上與撰寫論文的壓力。

摘要



本研究為透過非破壞監測膠合接口於溫濕熱環境內部損傷程度。將碳纖維強化基板塗佈含有奈米碳管的環氧樹脂，使其試片具有導電性，並於試片兩側埋入銅箔接膠帶，以便監測其試片電性資料。

試片於高溫高濕環境及高溫低濕環境試驗中，監測試片於不同天數下，電性變化情形，以及經過濕熱老化後，機械性質下降的程度。抑或是透過電性的趨勢或改變，掌握其破壞的機制，能否觀察出介面弱化與基材弱化相對應到的電性趨勢，最後也透過 SEM 觀察其破斷面微觀破壞情形。

實驗結果顯示，利用電壓監控試片於高溫高濕及高溫低濕過程，僅能做定性分析，不太適合用來做定量分析。透過 SEM 觀察到，高溫高濕試片複材纖維有明顯樹脂塑化、纖維拔出(Fiber Pulled-Out)及介面弱化現象，高溫低濕試片複材本身無纖維拔出(Fiber Pulled-Out)，搭接劑斷面上有明顯脆性斷裂痕跡。

關鍵詞：單搭接膠合接口、碳纖維複合材料、電壓監測結構完整性、濕熱老化、
奈米碳管

Abstract



This study deals with monitoring single lap CNT-epoxy joints of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by conductivity in hygrothermal environment. The adhesive is conductive because it's made of epoxy resin mixed with carbon nanotubes. The material is of the sheet in this experiment is made of CFRP by thermoforming .For voltage change measurement, copper foil is embedded in CFRP and welded with wires to measure the voltage change of entire adhesive joint.

The specimen will be set in hygrothermal environment and observe the voltage changes and mechanical properties during the experiment. .Find out the relationship between conductivity and failure mechanism. Using SEM to analyze materials' fracture surface.

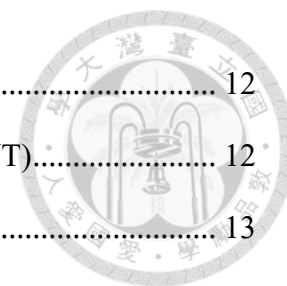
The result of the experiments showed that voltage change measurement could do qualitative analysis to the load and aging experiment period. The specimens of high temperature and moisture experiment reveals resin plastic 、Fiber Pulled-Out and weakening of interface but it doesn't reveal in the specimens which is set in high temperature and low moisture environment. It has been observed that the brittle fracture trace on the adhesive joint.

Keywords: Single lap joint, Carbon-fiber reinforced composite, Hygrothermal aging, Voltage change measurement, Carbon nanotubes

目錄



致謝	I
摘要	II
Abstract.....	III
目錄	IV
圖目錄	VIII
表目錄	XI
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	1
1.3 章節說明	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 膠合接口	3
2.1.1 單搭接膠合接口(SLJ)	3
2.1.2 膠合接口製備參數	3
2.2 電性監測	4
2.2.1 奈米碳管	4
2.2.2 電性趨勢與破壞機制	4
2.2.3 循環拉伸時初期電阻下降原因	8
2.3 高溫高濕	8
2.4 總結	11
第三章 實驗材料與儀器	12
3.1 複材製備相關材料與設備	12

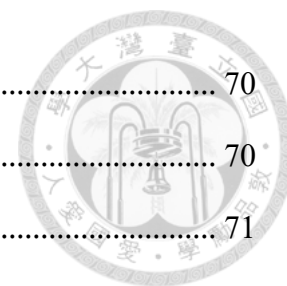


3.1.1 搭接劑	12
3.1.2 多壁奈米碳管(Muti-wall carbon nanotube, MWCNT).....	12
3.1.3 碳纖維預浸布	13
3.1.4 噴砂機	13
3.1.5 鑽石砂輪機	14
3.1.6 改良式熱壓成型系統	15
3.2 搭接劑調配相關設備	15
3.2.1 電磁加熱攪拌器	15
3.2.2 超音波打碎機	16
3.2.3 均質機	17
3.3 溫濕熱環境相關設備	17
3.3.1 恆溫水槽	17
3.3.2 恆溫恆濕箱	18
3.3.3 熱風循環烘箱	19
3.4 電性量測與資料擷取設備	20
3.4.1 電源供應器	20
3.4.2 多功能 I/O 介面卡	20
3.5 萬能材料試驗機	21
第四章 實驗方法與流程	22
4.1 試片命名規則	22
4.2 單搭接碳纖維強化複合材料製備	22
4.2.1 單搭接膠合接口內埋同銅箔試片製備	22
4.2.2 搭接試片前處理	23
4.2.3 搭接與搭接劑調配	24
4.3 高溫高濕環境實驗	26
4.4 高溫低濕環境實驗	26



4.5 乾燥	27
4.6 循環加載卸載拉伸測試	27
4.7 破斷面觀察	27
第五章 結果與討論	28
5.1 試片強度品管	28
5.2 高溫高濕	30
5.2.1 高溫高濕下電壓變化	30
5.2.2 高溫高濕 15 天後乾燥 5 天強度測試	35
5.2.3 高溫高濕 30 天乾燥 5 天強度測試	35
5.2.4 高溫高濕 30 天強度測試	37
5.2.5 高溫高濕試片乾燥與未乾燥試片強度比較	38
5.2.6 高溫高濕 150 天乾燥 5 天強度測試	39
5.2.7 高溫高濕電壓變化與強度關係	40
5.2.8 高溫高濕總結	42
5.3 高溫低濕	44
5.3.1 高溫低濕電壓變化	44
5.3.2 高溫低濕 30 天乾燥 5 天強度測試	47
5.3.3 高溫低濕 90 天乾燥 5 天強度測試	48
5.3.4 高溫低濕電壓變化與強度關係	49
5.3.5 高溫低濕總結	50
5.4 循環加載卸載拉伸試驗	51
5.4.1 電性變化	51
5.5 破斷面觀察結果	58
5.5.1 試片切面氣泡	58
5.5.2 破斷面觀察	59
第六章 結論與未來展望	70

6.1 結論	70
6.2 未來展望	70
參考文獻	71
附錄	73
循環加載卸載拉伸試驗	73
高溫高濕與高溫低濕實驗過程電壓變化	96
高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片	96
高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片	98
高溫高濕 30 天未乾燥試片	100
高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片	102
高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片	103
高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片	105



圖目錄

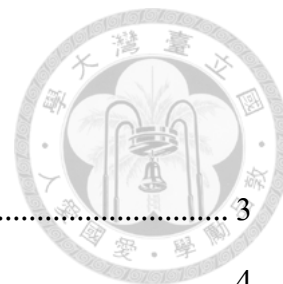
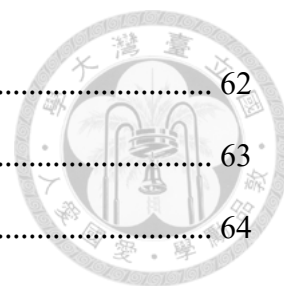


圖 2.1 不同的搭接型式	3
圖 2.2 不同搭接長度的極限破壞強度與剪強度關係圖	4
圖 2.3 三種失效形式相對應三種電阻變化趨勢(a)adhesive failure (b)adhesive&composite failure (c)composite failure	6
圖 2.4 電阻與聲學特徵行為(a)adhesive failure, (b) combined adhesive and composite failure and (c) composite failure.....	7
圖 2.5 不同方向碳纖維疊層的短路現象	8
圖 2.6 濕熱老化對界面結構和吸濕影響	10
圖 2.7 濕熱老化對機械性質的影響	10
圖 2.8 各種搭接劑的強度	11
圖 2.9 各種搭接劑的剪切強度隨濕熱老化時間的變化	11
圖 3.1 環氧樹脂 A 劑與 B 劑.....	12
圖 3.2 多壁奈米碳管	13
圖 3.3 碳纖維預浸布	13
圖 3.4 噴砂機	14
圖 3.5 鑽石砂輪切割機	14
圖 3.6 改良式熱壓機	15
圖 3.7 電磁加熱攪拌器	16
圖 3.8 超音波打碎機	16
圖 3.9 高速均質機	17
圖 3.10 恆溫水槽	18
圖 3.11 恆溫恆濕箱	19
圖 3.12 熱風循環烘箱	19
圖 3.13 電源供應器	20

圖 3.14NI-6009.....	20
圖 3.15 萬能材料試驗機.....	21
圖 4.1 改良式隔膜成型法.....	23
圖 4.2 預浸布熱壓成化曲線圖.....	23
圖 4.3 單搭接試片 100mm x 25mm.....	24
圖 4.4 搭接劑的調配參數經改善後之脫泡過程.....	25
圖 4.5 搭接示意圖.....	26
圖 4.6 單搭接接口尺寸示意圖.....	26
圖 4.7 負載與時間關係.....	27
圖 5.1S10N3 高溫高濕 15 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖.....	31
圖 5.2S7N5 高溫高濕 30 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖.....	31
圖 5.3S3N4 高溫高濕 150 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖.....	32
圖 5.4S1~S5 各種實驗類別的試片平均破壞強度.....	43
圖 5.5S7~S11 各種實驗類別的試片平均破壞強度.....	44
圖 5.6S11 恆溫恆濕試片升溫階段電壓變化與溫度關係圖.....	46
圖 5.7S11N3 恆溫恆濕與乾燥過程試片電壓變化與時間關係圖.....	46
圖 5.8S5N3 長天期恆溫恆濕與乾燥過程試片電壓變化與時間關係圖.....	47
圖 5.9S9N2-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖.....	52
圖 5.10S10N1-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖.....	53
圖 5.11S8N2-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖.....	54
圖 5.12 金相顯微鏡倍率 200X，搭接劑脫泡一次之試片切面(紅色圓圈處為光纖， 藍色方框處為氣泡).....	58
圖 5.13 金相顯微鏡倍率 200X，搭接劑脫泡三次之試片切面(紅色圓圈處為光纖， 藍色方框處為氣泡).....	59
圖 5.14 未經老化實驗試片搭接劑與碳纖維膠合情況&搭接劑脆性斷裂的放射狀痕 跡之 SEM 圖.....	61

圖 5.15 高溫高濕短天期試片破斷面觀察	62
圖 5.16 高溫高濕短天期試片纖維拔出現象	63
圖 5.17 高溫高濕長天期試片破斷面觀察	64
圖 5.18 高溫高濕長天期試片纖維拔出與樹脂塑化現象	65
圖 5.19 高溫低濕短天期試片側向觀察破斷面	66
圖 5.20 高溫低濕短天期試片搭接劑與複材纖維介面	67
圖 5.21 高溫低濕長天期試片側向觀察破斷面	68
圖 5.22 高溫低濕長天期搭接劑與複材纖維介面	69



表目錄



表 4.1 實驗種類與編號縮寫	22
表 5.1S1~S5 試片一致性.....	29
表 5.2S7~S11 試片一致性.....	29
表 5.3 經高溫高濕 30 天乾燥 5 天後電壓增加情形	33
表 5.4 經高溫高濕 30 天未乾燥試片電壓增加情形	34
表 5.5 經高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片電壓增加情形	34
表 5.6 經高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片電壓增加情形	35
表 5.7 高溫高濕 15 天乾燥 5 天後試片強度	35
表 5.8S1~S4 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片強度.....	36
表 5.9S7~S9 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片強度.....	37
表 5.10 高溫高濕 30 天未乾燥試片強度	38
表 5.11 乾燥試片與未乾燥試片強度比較	39
表 5.12 高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片強度	40
表 5.13 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係	41
表 5.14 高溫高濕 30 天未乾燥試片電壓變化與強度關係	41
表 5.15 高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係	42
表 5.16 高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係	42
表 5.17S3 與 S4 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片強度.....	48
表 5.18S11 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片強度	48
表 5.19 高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片強度	49
表 5.20 高溫低濕 30 天乾燥 5 天電壓變化與強度關係	50
表 5.21 不同種類試片卸載時電壓變化情形	55
表 5.22QA 試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載回 500N 之電壓變化	

百分比表	55
表 5.23 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載 回 500N 之電壓變化百分比表	56
表 5.24 高溫高濕 30 天未乾燥試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載回 500N 之電壓變化百分比表	56
表 5.25 高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載 回 500N 之電壓變化百分比表	57
表 5.26 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載 回 500N 之電壓變化百分比表	57
表 5.27 高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載 回 500N 之電壓變化百分比表	57

第一章 緒論



1.1 前言

碳纖維強化複合材料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)，因其具備比强度高、比勁度、優異容損能力及耐腐蝕等優點，運用也越來越普及。如：離岸風機、航太結構及冷卻水塔。這些大型結構透過單搭接膠合接口的方式，可以避免鑽孔所產生的應力集中的問題。但是，CFRP 長期暴露於高溫、高濕及外部應力環境容易使其發生嚴重老化現象。而吸收水分對環氧樹脂也會造成嚴重損傷，像是降低玻璃轉化溫度、機械強度等，並導致聚合物溶脹[1]。隨著損傷演化，纖維、介面與基材都可能發生相應的化學物理變化[2]。

過去的非破壞檢測方法並無法確切了解實時破壞程度，如共振頻率的漂移[3]及阻尼改變[4]，這些監測技術還無法有效地掌握損傷程度。在高溫高濕與高溫低濕的環境，容易導致結構膠產生濕熱老化現象及結構膠劣化效應，故有必要掌握其破壞程度。

1.2 研究動機

目前對於複材於溫濕環境劣化機制的研究已有許多，但對其裂化監控技術仍甚為缺乏。本研究擬採用電性來觀察膠合接口於高溫高濕與高溫低濕環境的變化情形，試圖利用觀察電壓變化率趨勢，來找尋破壞程度和破壞機制與其之間關連性。老化所造成的破壞可分為樹脂塑化、基材/纖維介面弱化，體積膨脹所產生的應力結合內部殘留應力導致介面剝離。

本研究將利用各項電性資料來觀察複材於不同環境下，電性會有哪一些變化，試圖將其定量老化程度。探討受老化影響試片，透過循環加載卸載拉伸試驗時，觀察試片老化程度。



1.3 章節說明

第一章 緒論

簡介利用電性監測複材於溫濕熱環境所造成的影響，及研究必要性與研究動機。

第二章 文獻回顧

回顧單搭接膠合接口、電性監測、溫濕熱老化

第三章 實驗設備及儀器

介紹實驗所用設備

第四章 實驗方法與流程

試片命名規則，複材試片製作流程，量測方式，循環加載卸載拉伸試驗。

第五章 實驗結果與討論

討論不同天數試片於高溫高濕與高溫低濕環境所受老化影響的程度。

第六章 結論與未來展望

統整實驗數據並提出後續研究的建言。

第二章 文獻回顧



2.1 膠合接口

2.1.1 單搭接膠合接口(SLJ)

利用搭接劑將兩片試片膠合在一起，搭接面積為矩形，試片兩兩疊合在一起，稱之為單搭接膠合接口。依照搭接形狀與搭接次數的差異，又可分為單搭接、斜搭接、雙搭接的型式[5]，如圖 2.1。

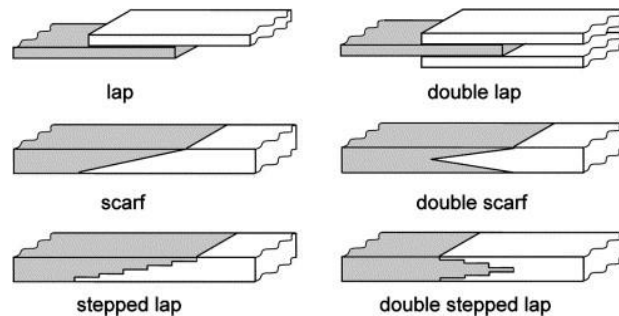


圖 2.1 不同的搭接型式[5]

2.1.2 膠合接口製備參數

2008 年，Kahraman 等人[6]利用鋁合金為搭接物，研究不同厚度對於 SLJ 機械性質的影響。發現搭接劑厚度超過 0.07mm 時，試片強度會隨厚度增加而減強度下降，而 0.03mm~0.07mm 的厚度改變，並不影響其強度。但使用彈性的搭接劑除外[7]。

2015 年，Jianfeng Li 等人[7]對於不同的搭接長度進行測試，分別為 2mm、5mm、10mm 以及 20mm，隨著搭接長度的增長，強度也隨著增加，分別是 1.3%、7.4%、9.2%。如圖 2.2，很明顯地，單搭接接頭的極限破壞負載隨著搭接長度的增加而增加。當搭接長度小於 10 mm 時，極限破壞載荷與搭接長度之間

的關係近似為線性。然而，隨著重疊長度超過 10mm，增加速度變慢。

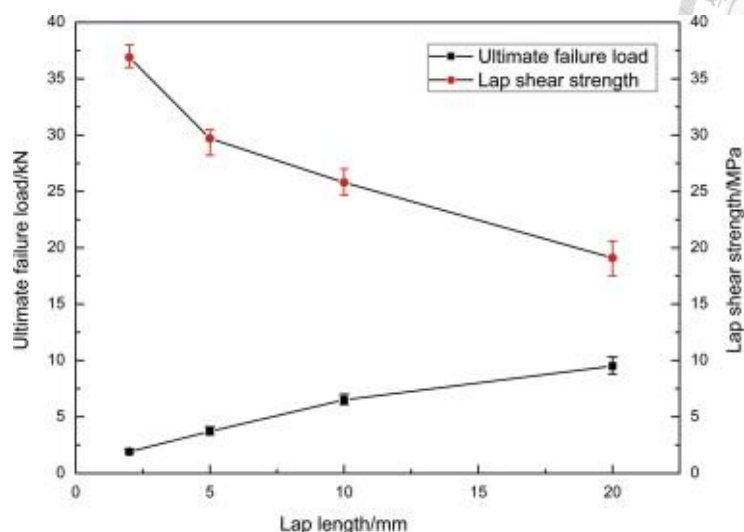


圖 2.2 不同搭接長度的極限破壞強度與剪強度關係圖[7]

2.2 電性監測

2.2.1 奈米碳管

奈米碳管(CNT)具有獨特的分子結構和優異的熱、光學、電子和機械性能[8]。將其運用在聚合物、金屬和奈米複合材料中具有增強效果[9]。將 CNT 均勻的混入環氧樹脂能使其具有良好的化學作用[10]，並將電子與聲子提供導電網絡[11]。MWCNTs 具有低表面積與較高長寬比的特性，因此能在較低的含量下，有效提高導電性。[12]

2.2.2 電性趨勢與破壞機制

2011 年 Amanda 等人[13]分別將三個試片施以三種不同的表面處理方式，再做循環加載卸載拉伸試驗，產生三種不同失效形式。最後斷定出不一樣的電阻變趨勢如圖 2.3，能夠明確掌握其破壞機制。為了進一步驗證三種不同趨勢所造成



不同的破壞機制，透過循環加載卸載時的聲發行為觀察到，如圖 2.4 所示。試片沒有經過處理在破壞前，電阻與聲洩都有急遽的上升如圖 2.4(a)這是由於單搭接試片循環加載卸載固有的彎曲應力所導致裂痕重新張開。2009 年 Gao 等人[14]將初始電阻增加與裂痕重新張開、電阻斜率初始變化後的第二個線性區域與彈性變形和最終的線性區域隨著新裂紋形成的電阻變化區域；在這種情況下可以進行類似的評估。電阻在循環張力加載期間的非線性行為是永久性損壞的指標。而圖 2.4 (b)中，試片經過矽烷表面處理過的試片，可以觀察到裂紋沒有重新張開且只有新的破壞產生，這也使得電阻隨著負載增加會不斷上升直至失效。

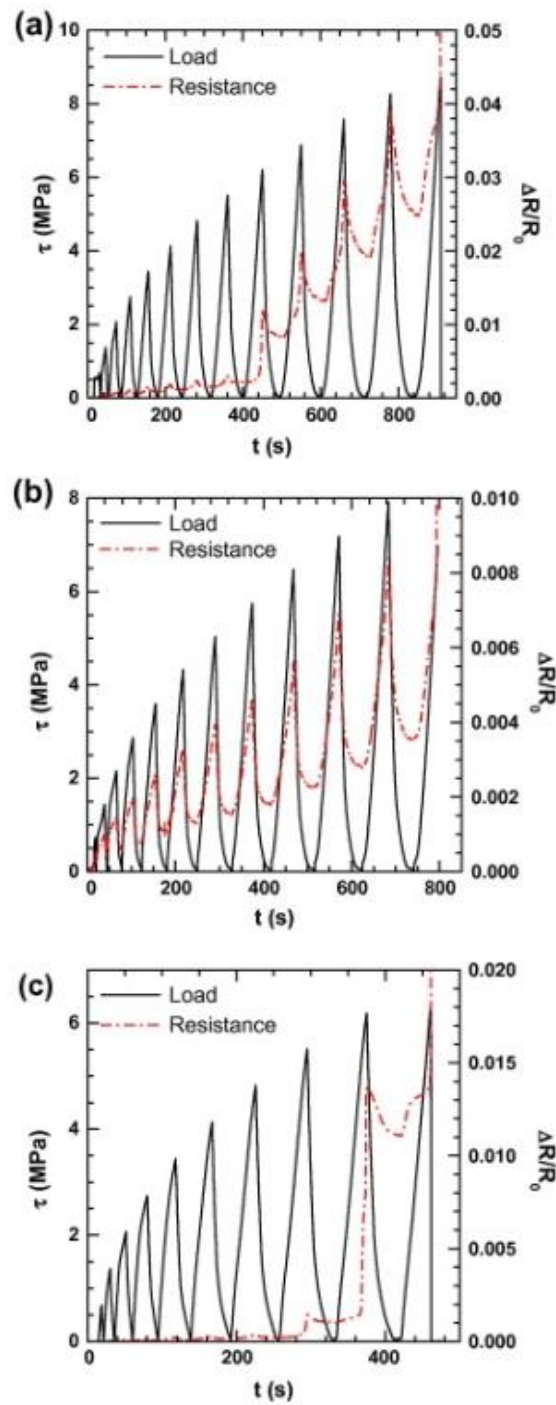


圖 2.3 三種失效形式相對應三種電阻變化趨勢(a)adhesive failure
(b)adhesive&composite failure (c)composite failure[13]

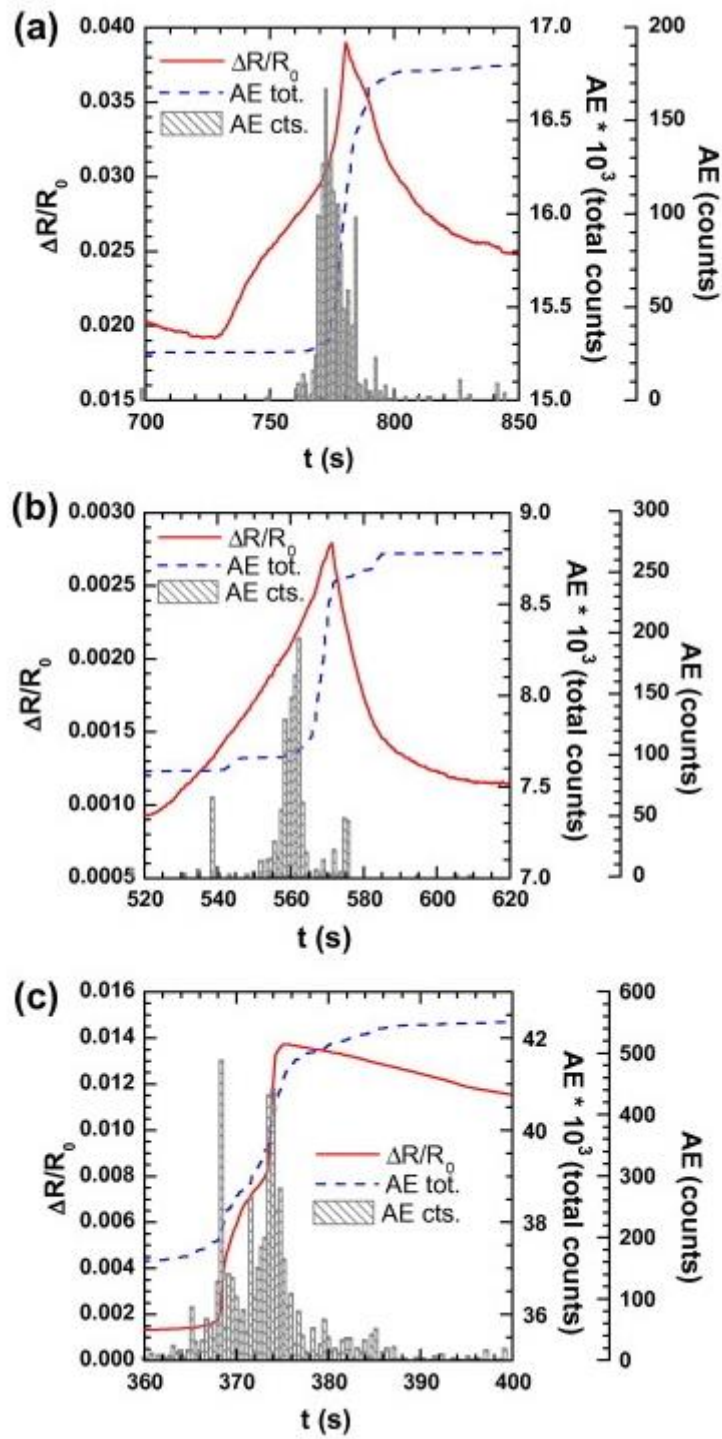


圖 2.4 電阻與聲學特徵行為(a)adhesive failure, (b) combined adhesive and composite failure and (c) composite failure[13]



2.2.3 循環拉伸時初期電阻下降原因

試片在循環加載卸載過程中，除了發生應變計效應以外，搭接劑也會有裂縫生成，CNT 導電網絡也會受到阻礙或中斷，電阻也將隨之抬升。但在文獻當中都能觀察到負載增加初期，電阻會先產生下降趨勢。A.Vavouliotis 等人[15]提出以下幾種可能造成初始電阻下降的原因，一為不可逆的(0°)碳纖維排列增加造成導電率提升；加載過程中試片原先的殘留應力減少；纖維間的電路通道增加；(0°)與(45°)層碳纖維之間會形成短路現象，如圖 2.5。

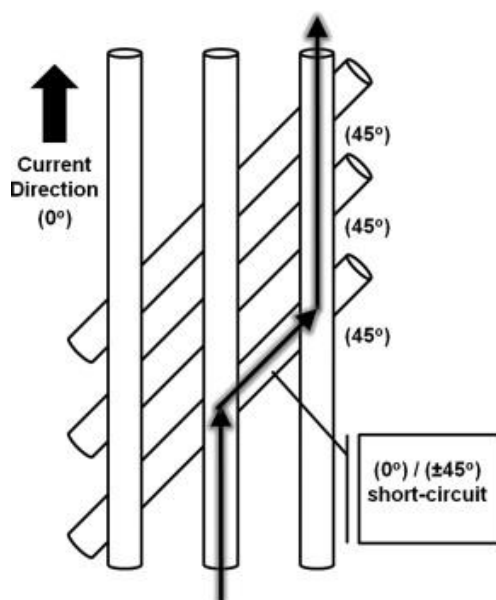
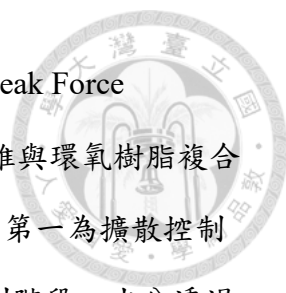


圖 2.5 不同方向碳纖維疊層的短路現象[15]

2.3 高溫高濕

2007 年，Ying Wang 等人[16]利用原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)，觀察碳纖維斷面於高溫環境(120°C、150°C、200°C)與 100%RH 相對濕度環境，測試碳纖維複合材料於高溫高濕環境所受影響為何。經過 1500 小時的高濕環境作用下，樹脂與碳纖維的間距大幅下降，他們推測這是由於環氧樹脂吸收水氣，樹脂膨脹所導致。而在高溫環境作用下，他們推測樹脂會有揮發損失與額外的成化收縮，導致樹脂與碳纖維間距增加。



2021 年，Yi-Fan Niu 等人[17]，利用峰值力定量奈米力學(Peak Force Quantitative Nanomechanical Mapping PF-QNM)技術，觀察碳纖維與環氧樹脂複合材料界面，受溫濕熱環境影響。CFRP 吸濕行為可分為兩階段：第一為擴散控制階段，水分主要通過基材和界面流入材料內部；第二為鬆弛控制階段，水分透過界面的分離與樹脂的裂縫快速的擴散進入材料內部。為了避免界面失效情形，將實驗控制在第一階段。如圖 2.6 所示，在 0 到 8 小時之間，試片的界面尺寸增加了 145.1%，在 8 小時之後趨於穩定，而吸濕的比率持續上升。彎曲強度在 4 小時後驟降，而在 8 跟 12 小時得時候會有些回升，之後呈現下降的現象，如圖 2.7。他們推測濕熱老化初期，材料迅速吸收水分，內部殘餘應力消失，因此在彎曲強度方面會有先驟降的情形發生，再來是因為樹脂高溫進行下的二次固化，使強度有所回升。之後隨時間增加，基材發生溶脹與塑化，導致整體強度下降。

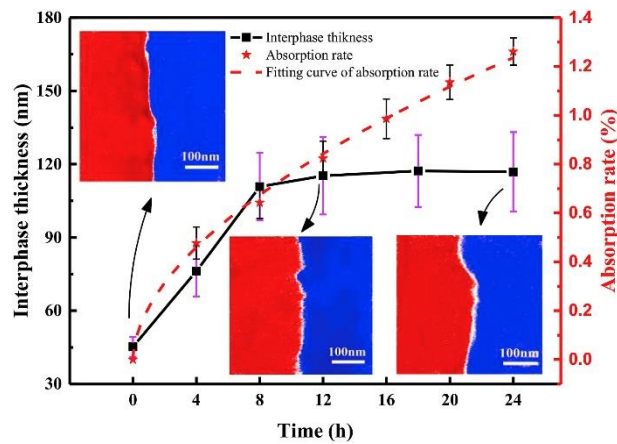


圖 2.6 濕熱老化對界面結構和吸濕影響[17]

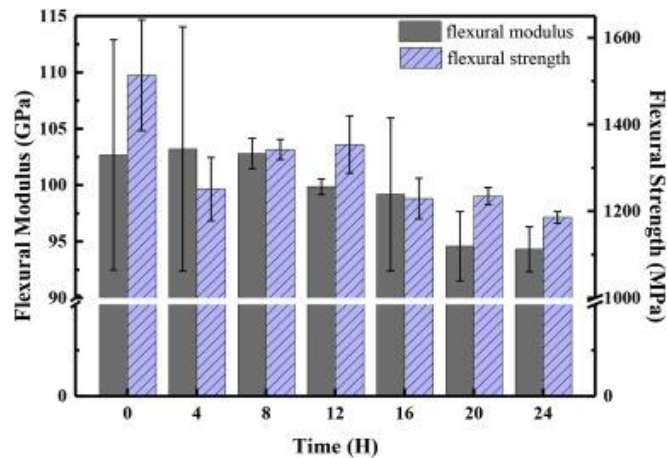


圖 2.7 濕熱老化對機械性質的影響[17]

2017 年，Panta Jojibabu 等人[18]將三種材料混入環氧樹脂，分別是多壁奈米碳管(CNT)、石墨烯奈米貼片(GNP)、奈米碳角(CNH)，三種材料都有助於提升試片強度分別是增加 41%、49% 和 46%，如圖 2.8。他們發現接頭強度隨濕熱老化時間加而降低，但是與純環氧樹脂相比，有添加填料的試片，強度下降的幅度比較低，如圖 2.9，濕熱老化處理 12 週後，純環氧樹脂的搭接剪切強度降低了 55%，EP-CNT 降低了 30%，EP-GNP 降低了 27%，EP-CNH 降低了 43%。還觀察到純環氧樹脂和添加奈米填料試片的剪切強度不會只是單純下降，而是在老化 12 週後達到穩定值，GNP 試片表現出最好的耐老化性，其次是 CNT 和 CNH。

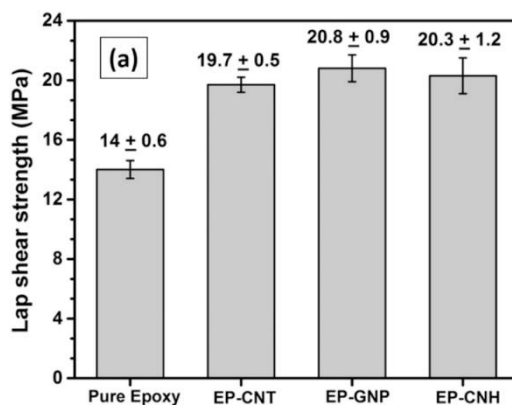


圖 2.8 各種搭接劑的強度[18]

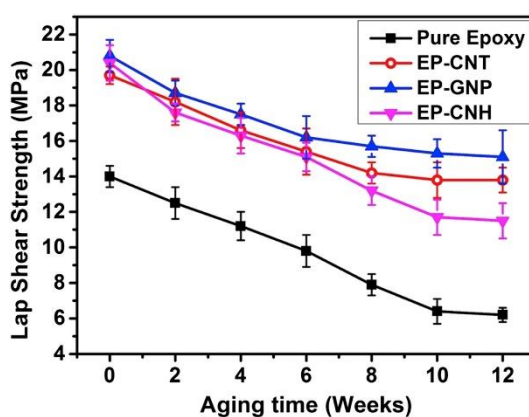


圖 2.9 各種搭接劑的剪切強度隨濕熱老化時間的變化[18]

2.4 總結

經過前面文獻參考，本研究將利用單搭接碳纖維複材，在環氧樹脂內混入多壁奈米碳管，使試片具有導電性，透過試片電壓變化，觀察它與機械性質改變的關聯性為何。此外，溫濕環境不僅會影響試片強度，也會改變其破壞機制，試圖利用其電性趨勢與電壓變化百分比，量化強度變化與界定破壞機制。

第三章 實驗材料與儀器



3.1 複材製備相關材料與設備

3.1.1 搭接劑

本實驗採用上緯興業股份有限公司生產的環氧樹脂 A 劑與 B 劑，作為搭接劑，型號為 SW2261-A/SW2261-BS，如圖 3.1，混合比例為 A:B=10:2.5(wt%)。



圖 3.1 環氧樹脂 A 劑與 B 劑

3.1.2 多壁奈米碳管(Muti-wall carbon nanotube, MWCNT)

本實驗採用由 Haydale 所生產的多壁奈米碳管，型號為 MWCNT-NH3-STD，如圖 3.2。碳管外徑為 9.5nm、長度為 1500nm、比表面積(SSA)250~300 m²/g。利用 MWCNT 混入環氧樹脂使其具備導電性。



圖 3.2 多壁奈米碳管

3.1.3 碳纖維預浸布

本實驗本實驗使用福懋興業股份有限公司所生產的 ECU431 碳纖單向環氧樹脂預浸布(圖 3.3)，進行堆疊、埋入銅箔及熱壓成形製作成碳纖維複材試片。碳纖維補強材料每單位面積含纖維重量 150 g/m²，環氧樹脂所占重量百分比為 37%。預浸布須存放於-18°C 冰櫃中，避免部分反應而固化。



圖 3.3 碳纖維預浸布

3.1.4 噴砂機

本實驗利用噴砂機來除去碳纖維試片表面的絕緣層，提高試片的導電性與穩

定性。噴砂機，為飛旗股份有限公司所生產，型號為 SB03A，沙粒為金鋼砂 #120，機台本身的壓力調節鈕可調整壓力從 0 至 10 kg/cm²，如圖 3.4 所示。



圖 3.4 噴砂機

3.1.5 鑽石砂輪機

本實驗所使用的鑽石砂輪機由建德工業股份有限公司製造，型號為 KCF-52ADH，如所示圖 3.5。鑽石砂輪刀片以每分鐘 4500 轉的轉速來裁切複材試片，並以自來水作為切削液，降低切削溫度與排除切屑。



圖 3.5 鑽石砂輪切割機



3.1.6 改良式熱壓成型系統

熱壓成型系統由熱壓機、真空幫浦、空壓機所組成。本實驗的碳纖維強化環氧樹脂預浸布須在高溫 145°C 下成化，固使用改良式隔膜成形法使預浸布熱壓成形。利用油壓機使上下平台貼合，再利用真空膜與真空膠，製造出密閉空間，並將壓力維持在 10kg，最後開啟上下盤加熱器。熱壓機為帝昇企業股份有限公司所生產，空壓機為皇誠機電有限公司所生產，提供預浸布成化所需之壓力，型號為 UTM50200，如圖 3.6 所示。排氣量 550 L/min，氣筒容量 200 L，最大使用壓力 20 kg/cm²。



圖 3.6 改良式熱壓機

3.2 搭接劑調配相關設備

3.2.1 電磁加熱攪拌器

本研究使用 LMS 公司所生產的 HTS-1003 電磁加熱攪拌器進行溶液的攪拌，轉速 60~1500 rpm，加熱溫度範圍 30 °C~380 °C，如圖 3.7 所示。



圖 3.7 電磁加熱攪拌器

3.2.2 超音波打碎機

本研究使用 Hielscher 生產的 UP200S 超音波打碎機，如圖 3.8 所示。將奈米碳管於搭接劑中的分散攪拌以及打碎叢聚現象。利用超音波在搭接劑中產生之氣穴現象(cavitation)，將奈米碳管打碎重組。輸出頻率 24 kHz，功率調配範圍 20~100%(最大輸出功率 200 W)。超音波產生器(sonotrode) 能量密度 105 W/cm^2 ，最大震幅 $125\mu\text{m}$ 。



圖 3.8 超音波打碎機



3.2.3 均質機

本實驗採用由德國 ART 公司生產的均質機(圖 3.9)，型號為 MICCRA D-9，轉速從 11,000rpm~39,000 rpm 共有五個檔次。利用高速旋轉帶動內刀具旋轉之方式，將 CNT 均勻地打入環氧樹脂。圖 3.10 為均質機刀頭。

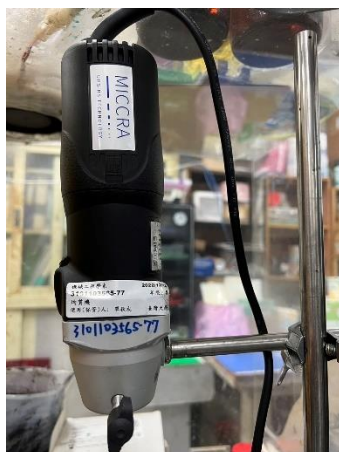


圖 3.9 高速均質機



圖 3.10 均質機刀頭

3.3 溫濕熱環境相關設備

3.3.1 恆溫水槽

本實驗使用盛慶企業股份有限公司所生產之循環式恆溫水槽，型號為 B401，如圖 3.11。恆溫水槽可控制溫度範圍為-20 °C - 100 °C。搭配自製補水系統，可

將水位維持一定高度，避免試片未完全浸泡於水中，且能穩定水溫。



圖 3.11 恆溫水槽

3.3.2 恆溫恆濕箱

本實驗採用天宜科技有限公司 TTH-B1TP-S 可程式控制桌上型恆溫恆濕箱 (圖 3.12)，利用它來進行高溫低濕實驗。溫度控制範圍為 $0^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ ，濕度控制範圍為 25 % R.H. – 95 % R.H.，其內部可容納尺寸為 $W\ 60 \times D\ 40 \times H\ 50\ \text{cm}$ 。



圖 3.12 恆溫恆濕箱

3.3.3 熱風循環烘箱

本研究採用登盈企業股份有限公司 DOS-45 熱風循環烘箱(圖 3.13)，將已搭接好的試片加熱到 100 °C 維持兩小時，完成樹脂所需固化條件。



圖 3.13 熱風循環烘箱



3.4 電性量測與資料擷取設備

3.4.1 電源供應器

本實驗採用洛克儀器股份有限公司所生產的電源供應器，如圖 3.14。電流範圍 10 nA~1 A，電壓範圍 20 mA~200 V，準確度 0.020%，解析度 500 nA。



圖 3.14 電源供應器

3.4.2 多功能 I/O 介面卡

本實驗所用的訊號擷取器由 National Instruments, United States 所生產，型號 NI-6009(圖 3.15)，用來擷取電供的電壓值。具有 4 組差分類比輸入插槽，解析度 14 位元，工作電壓 ± 10 V，最大採樣速率 48 KS/s。



圖 3.15 NI-6009



3.5 萬能材料試驗機

本實驗採用由國科企業有限公司所代理的 MTS-810 材料試驗系統(圖 3.16)，可應用於疲勞破壞、循環加載卸載、潛變等等測試，其最大動態軸向負荷為 100 kN，最大循環負載頻率為 40 Hz。

MTS 大致上可以分為三個部分，分別為：

1. 油壓動力供應系統(Hydraulic Power Supply System): 提供系統所需動力
2. 負荷單元(Load Unit): 上下夾頭，作為測試系統的固定端
3. 電子控制系統(Electronic Control System): 控制油壓系統及負荷單元，利用 TestWare-Sx 或 Function Generator 等軟體來精確控制夾頭的位移及力量。



圖 3.16 萬能材料試驗機

第四章 實驗方法與流程



4.1 試片命名規則

試片編號規則為 S○N○-T，S 表批次編號，N 為試片於該批次的次序，T 為實驗種類的編號縮寫，代入表 4.1 所列。

表 4.1 實驗種類與編號縮寫

實驗種類	編號縮寫
該批試片強度一致性 (Quality Assurance)	QA
高溫高濕N天 (Soak in the water N days)	SN
高溫高濕N天後乾燥N天 (Soak in the water N days&Dry N days)	SNDN
高溫低濕環境N天後乾燥N天 (Constant Temperature&Moisture N days &Dry N days)	CT&MNDN

4.2 單搭接碳纖維強化複合材料製備

4.2.1 單搭接膠合接口內埋同銅箔試片製備

將 10 片 21cm x 21cm 的碳纖單向環氧樹脂預浸布進行單一方向堆疊 $[0^\circ]_{10}$ 並於預浸布兩端埋入銅箔膠帶，再用鐵氟龍布包覆已疊層之預浸布。隨後將其放置熱壓機，利用改良式隔膜成型法(圖 4.1)。真空機將開始抽真空，排除氣泡使疊層更加緊密堆疊，空壓機施加 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，讓預浸布均勻受力。熱壓機上下盤加熱至

145°C 並維持 35 分鐘，使預浸布能夠完全程化。熱壓機加工過程如圖 4.2 所示。

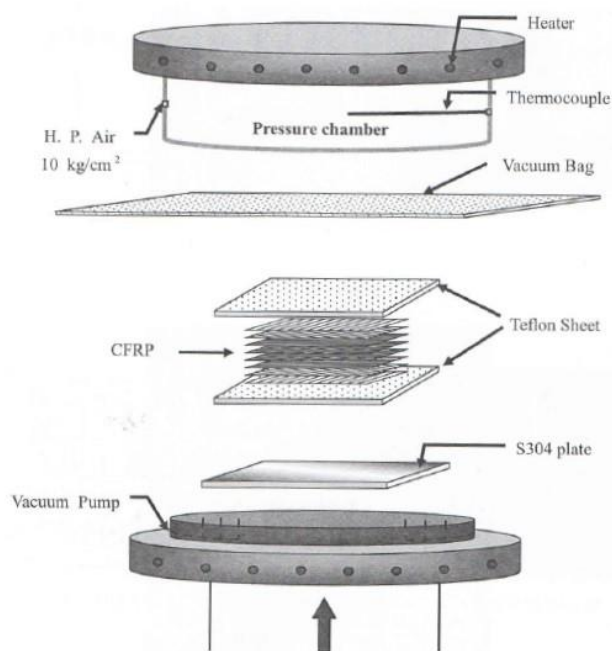


圖 4.1 改良式隔膜成型法

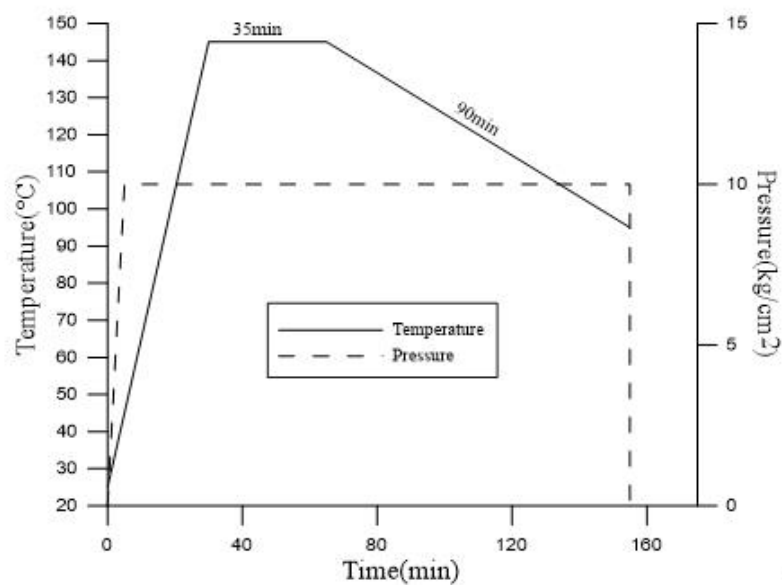


圖 4.2 預浸布熱壓成化曲線圖

4.2.2 搭接試片前處理

利用鑽石砂輪切割機將一碳纖維基板，裁切成 14 片 100mm x 25mm 的試

片，如圖 4.3 所示。試片將透過噴砂機，進行表面處理，除去熱壓後所殘留的 peel-ply 絕緣層。最後利用清水擦拭試片，利用拭淨紙和少許酒精擦拭試片，保持其搭接面整潔。

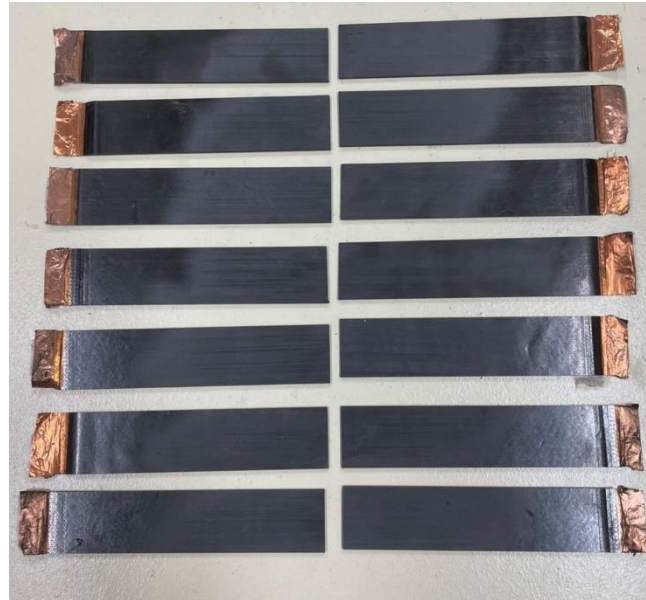


圖 4.3 單搭接試片 100mm x 25mm

4.2.3 搭接與搭接劑調配

本實驗室所用環氧樹脂 A 劑混合環氧樹脂 B 劑，添加奈米碳管，使其具有良好導電性，步驟如下：

1. 取出 400 毫升 A 劑，利用電磁加熱攪拌器將其加熱並充分攪拌，攪拌時間為 5 分鐘。
2. 將 0.3%wt 的奈米碳管添加到，已加熱之 A 劑，再利用玻棒把浮在液面上的奈米碳管攪拌均勻，使其沒入液面。
3. 利用超音波打碎機，將奈米碳管打散，操作時間為 5 分鐘。
4. 利用脫泡機，將樹脂內部氣泡抽出，操作時間為 30 分鐘。
5. 利用高速均質機以 21000rpm 下攪拌 1 分 30 秒，同一步驟重複 12 次。
6. 再次利用脫泡機，將樹脂內部氣泡抽出，操作時間為 30 分鐘。

7. 將盛有環氧樹脂燒杯，以隔水降溫方式，降溫至室溫。

8. 添加 B 劑 100 克，利用攪拌器充分攪拌。

9. 再次利用脫泡機，將樹脂內部氣泡抽出，即完成樹脂調配。

步驟 4 與 6 為批次 S5 後所新增，在批次 S5 之前，搭接劑時常因為內部氣泡太多，在脫泡機脫泡過程中，搭接劑會溢出燒杯，故增加脫泡次數，改善搭接劑內部氣泡問題，如圖 4.4，調配參數經改善後，搭接劑脫泡過程已不再溢出燒杯，而試片內部氣泡也確實明顯下降，這部分可以由圖 5.12、圖 5.13 破斷面觀察得證。



圖 4.4 搭接劑的調配參數經改善後之脫泡過程

脫泡完成後，立刻進行搭接。使用玻棒將搭接劑均勻塗抹在試片上，利用治具來確保試片不會滑動，如圖 4.5。搭接面上放置相同邊長之矩形鋁塊與 2.5 公斤重砝碼加壓，期間維持至少 16 小時，再用熱風箱 100°C 烘烤 2 小時，即搭接完成。在進行循環拉伸實驗前，會在試片兩端利用強力膠黏貼墊片(end-tab)，其墊片長度為 37.5mm，有高低落差的一側將會黏貼與墊片大小一樣的碳纖維墊片，如圖 4.6 所示。



圖 4.5 搭接示意圖

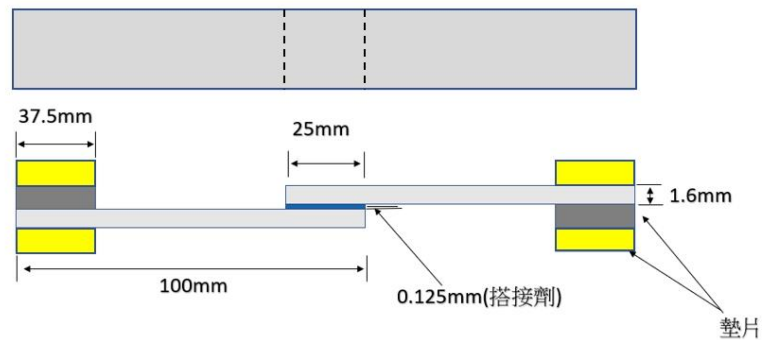


圖 4.6 單搭接接口尺寸示意圖

4.3 高溫高濕環境實驗

將試片浸泡於 60°C 熱水中，若干天(15、30、150)，泡水期間監測不同時期電壓變化情況。量測電壓時，先將試片取出水槽，擦拭試片表面水分且降回室溫再進行量測。

4.4 高溫低濕環境實驗

將試片放置於恆溫恆濕箱，設定其溫度 60°C 、濕度 30%RH，放置環境若干天(30、90)，並在高溫低濕環境進行電壓監測，包含其升溫過程。



4.5 乾燥

將完成 4.3 節與 4.4 節老化實驗後，部分試片將放置乾燥箱進行乾燥過程，乾燥期間亦透過電壓監測。

4.6 循環加載卸載拉伸測試

利用 MTS 力量控制系統模式，拉伸速率為 100N/s，循環拉伸前期以 1kN 為單位增加負載，超過 3kN 以後，則是以 0.5kN 為單位，並在拉伸至特定負載時維持 20 秒後，回 500N 與 50N 時亦同。MTS 將持續相同的步驟執行，直至試片產生斷裂或失效為止，負載與時間關係如圖 4.7。

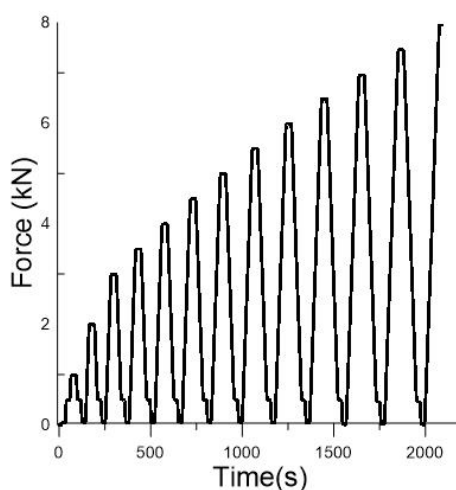


圖 4.7 負載與時間關係

4.7 破斷面觀察

本研究使用國立臺灣大學生物資源暨農學院共同儀器中心的電子顯微鏡 (Jeol,JSM-6510LV)觀察不同實驗試片破斷面。

第五章 結果與討論



本實驗將分為高溫高濕與高溫低濕兩大類別，經過不同時期溫濕熱老化實驗後，再分成乾燥與未乾燥試片，最後再執行拉伸實驗。試片在常溫、升溫與降溫階段進行電壓監測。透過電壓趨勢與電壓變化量和破壞機制討論其關聯性。

每批實驗搭接完成後，隨機抽取兩試片進行循環加載卸載拉伸實驗，檢視其搭接品質管控。其餘試片將進行不同的老化實驗，比較單純受到高溫影響的試片與高溫高濕試片，電性與機械性質變化。而 S6 為單純環氧樹脂為混入奈米碳管，故無電壓監測數據。

實驗試片的強度將分成兩部份討論，批次 S1~S5 為一部份，其餘批次為另一部份，主要原因為搭接劑調配參數不同，還有搭接時間長短不同，故強度上也會有所不同，同時也會造成老化實驗的結果有所差別。

5.1 試片強度品管

搭接劑完成脫泡後，因有成化時間限制，故每批實驗能夠搭接 7 組試片。為了瞭解每次搭接試片品質，將隨機抽取兩組試片進行循環加載卸載拉伸實驗，測試未經過老化實驗的試片強度一致性。表 5.1 為批次 S1~S5 品管試片，可以明顯看到在 S1~S5 的試片中，破壞強度跨批次標準差為 5.1%，且批次 S4 試片中的標準差高達 7.69%。而表 5.2 為批次 S7~S11 品管試片，破壞強度跨批次標準差僅為 1.9%。雖然批次 S1~S5 試片平均破壞強度為 7843N，批次 S7~S11 試片平均破壞強度為 7919N，相差不到 100N，不過 S1~S5 的跨批次標準差高達 5.1%，也說明批次 S1~S5 的試片，因為其搭接步驟少了兩次脫泡，導致跨批次試片的強度不夠一致。

表 5.1S1~S5 試片一致性

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	標準差(N)	標準差(%)	電阻(Ω)
S1	S1N6-QA	8024	8018	6	0.07	138
	S1N7-QA	8012				10668
S2	S2N1-QA	8413	8206	208	2.53	659
	S2N3-QA	7998				605
S3	S3N2-QA	7507	7511	4	0.05	840
	S3N3-QA	7514				1639
S4	S4N1-QA	7018	7603	585	7.69	148
	S4N3-QA	8187				1806
S5	S5N1-QA	7794	7881	87	1.10	135
	S5N2-QA	7967				220
跨批次平均破壞負載(N)		7843	7843	-	-	-
跨批次標準差(N)		401	288	-	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		5.1	3.7	-	-	-

表 5.2S7~S11 試片一致性

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	標準差(N)	標準差(%)	電阻(Ω)
S7	S7N1-QA	7946	7981	35	0.44	804
	S7N2-QA	8016				334
S8	S8N1-QA	7574	7795	221	2.84	4038
	S8N2-QA	8016				7504
S9	S9N2-QA	8020	8020	0	0.00	5624
	S9N3-QA	8020				6992
S10	S10N1-QA	7901	7926	25	0.31	2310
	S10N2-QA	7950				2994
S11	S11N1-QA	8016	7874	142	1.80	150
	S11N2-QA	7732				60
跨批次平均破壞負載(N)		7919	7919	-	-	-
跨批次標準差(N)		151	89	-	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		1.9	1.1	-	-	-



5.2 高溫高濕

5.2.1 高溫高濕下電壓變化

雖藉由觀察試片電壓在高溫高濕過程中的破壞程度表現，實質上為試片電阻改變，導致定電流下電壓改變，採用電壓紀錄，原因為電壓讀取較為方便。已

整理所有高溫高濕試片，高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片共 5 片，高溫高濕 30 天乾燥 5 天的試片共 16 片，高溫高濕 30 天未乾燥試片共 11 片，高溫高濕 150 天試片共 2 片，列舉不同時期與較為典型的高溫高濕試片電壓變化情形，由圖 5.1、圖 5.2、圖 5.3 可以看出試片從短天期到長天期電壓變化情形，在長達 150 天的高溫高濕過程中，電壓還是持續上升，並沒有出現飽和狀態，或是改變上升的趨勢。而電壓變化百分比的大小因試片不同而異，目前還無法準確的掌握各個試片的電壓變化量。

部份高溫高濕試片，在完成高溫高濕老化實驗後，將進行乾燥，而乾燥時電壓變化情形可以由圖 5.1、圖 5.2，試片在乾燥的第一天電壓下降的幅度最明顯，接下來幾天電壓幾乎出現穩定的現象，這可以解釋為試片所吸附的水分，可以在短時間內就蒸發完，導致乾燥的第二天以後，電壓幾乎維持穩定。

S10.N3-Soaking & Drying process

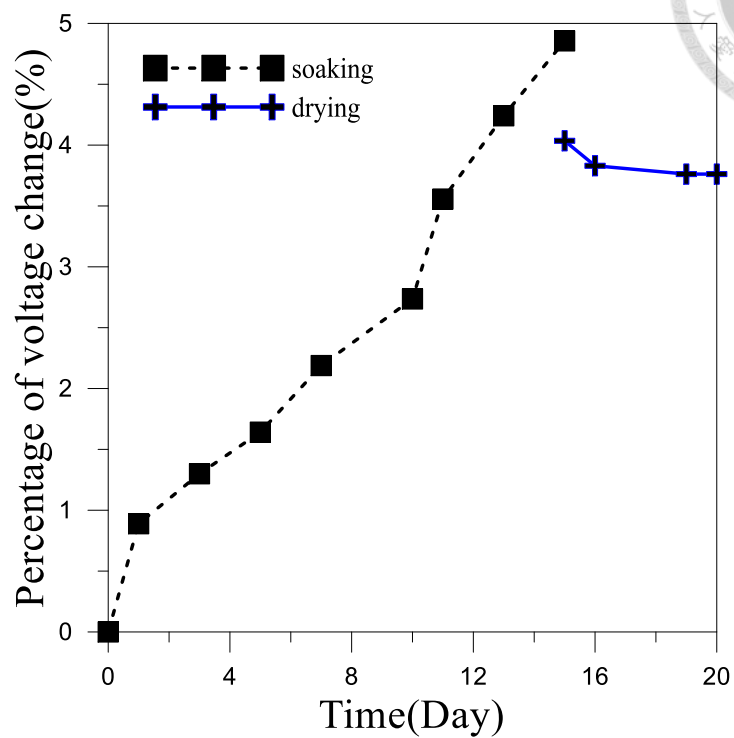


圖 5.1S10N3 高溫高濕 15 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖

S7.N5-Soaking & Drying process

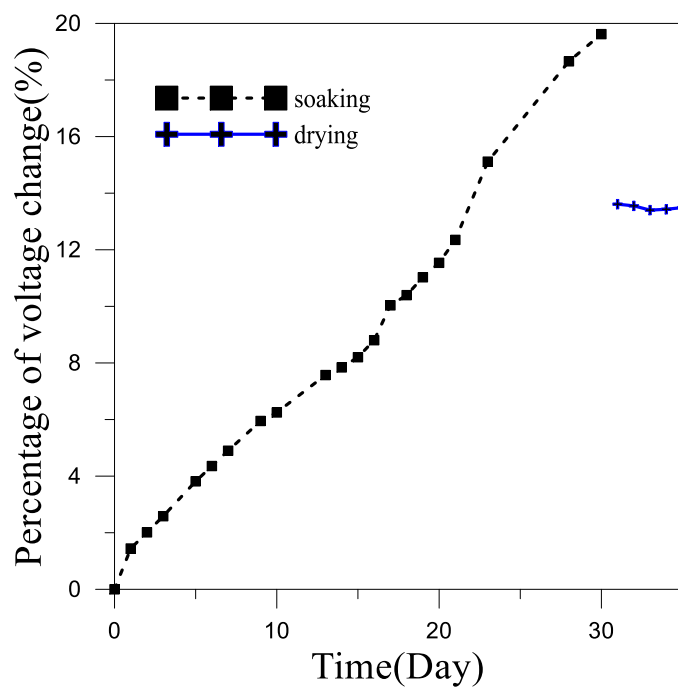


圖 5.2S7N5 高溫高濕 30 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖

S3.N7-Soaking & Drying process

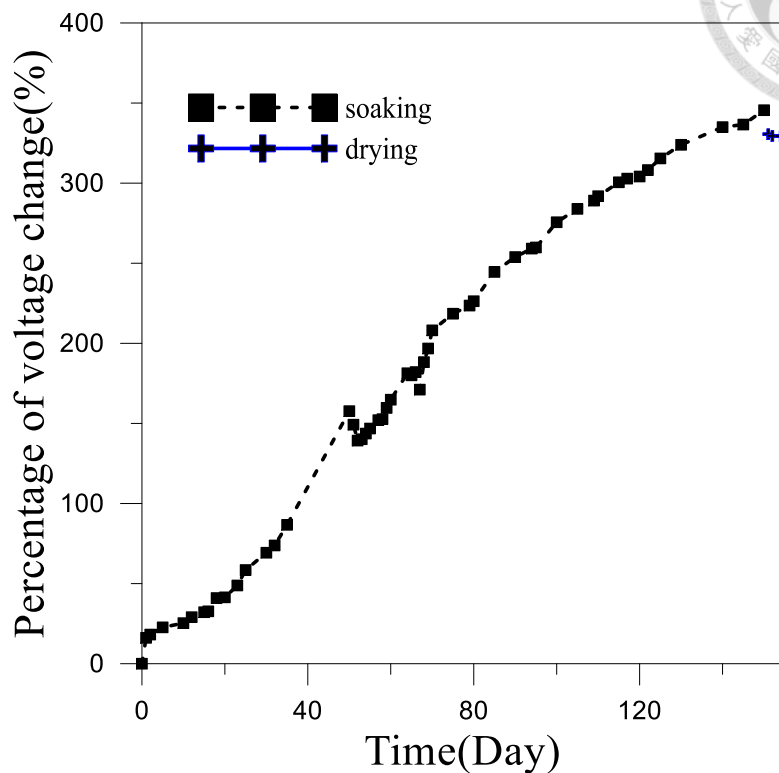


圖 5.3S3N4 高溫高濕 150 天乾燥 5 天電壓變化與時間關係圖

表 5.3 為高溫高 30 天乾燥 5 天試片原始電阻、給定電流、原始電壓、老化實驗後電壓增加百分比(高溫高濕 30 天後電壓增加百分比)、老化實驗後乾燥完電壓增加百分比、老化實驗後乾燥完各批次試片電壓增加百分比，表格中「X」為實驗過程中，埋入碳纖維複材的銅箔膠帶產生斷裂，故無法取得電性數據。可從表中觀察到各批次試片原始電阻差異甚大，而經過高溫高濕 30 天乾燥 5 天老化實驗後的電壓百分比增加量也差很多，無論是同批次試片互比，或是跨批次試片相比。如 S3N1 試片經過高溫高濕 30 天實驗後，與原始電壓相比增加了 84.1%，再乾燥 5 天後的電壓，仍比原始電壓增加了 78%，而 S9N1 經過高溫高濕 30 天實驗後，與原始電壓相比增加了 10.7%，再乾燥 5 天後的電壓，仍比原始電壓增加了 10%。試片原始電阻的大小，並不是影響其最後電壓變化百分比增加多寡的主要原因，而造成試片這樣的現象最主要還是因為濕度關係，試片在接觸到高濕度

環境，不同試片的電壓變化百分比增加差異大。其餘高溫高濕實驗試片(表 5.4、表 5.5、表 5.6)，從短天期到長天期以及高溫高濕後乾燥試片都是如此，經過老化實驗後，相同天數的試片相比，電壓增加百分比都差很多。



表 5.3 經高溫高濕 30 天乾燥 5 天後電壓增加情形

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)	老化實驗後與乾燥後各批平均電壓增加(%)
S1	S1N4	2472	0.5	1.236	12.5	11.8	11.8
	S1N5	948	2	1.896	X	X	
S2	S2N4	1836	1	1.836	48.2	44	25.1
	S2N5	3083	1	3.083	12.8	10.9	
	S2N6	852	5	4.26	23.3	20.4	
	S2N7	273	5	1.365	X	X	
S3	S3N1	891	4	3.564	84.1	78	78.0
	S3N6	X	4	X	X	X	
S4	S4N4	847	2	1.694	41	34.8	21.9
	S4N5	731	2	1.462	10.5	9	
S7	S7N5	1664	2	3.328	19.6	13.5	33.4
	S7N7	1302	2	2.604	67.3	53.2	
S8	S8N6	2610	0.5	1.305	26.2	24.2	18.3
	S8N7	3062	0.5	1.531	22	12.3	
S9	S9N1	8104	0.5	4.052	10.7	10	12.9
	S9N4	4490	0.5	2.245	18	15.7	
跨批次平均		2211	-	-	30.5	26.0	28.8
跨批次標準差		1998	-	-	23	21	23
跨批次標準差(%)		90.4	-	-	76.4	80.9	79.8

表 5.4 經高溫高濕 30 天未乾燥試片電壓增加情形

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	高溫高濕後各批平均電壓增加(%)
S5	S5N5	76.15	20	1.523	110.44	131.76
	S5N6	71.95	20	1.439	120.50	
	S5N7	37.85	20	0.757	164.33	
S7	S7N3	1094.5	2	2.189	36.77	92.46
	S7N4	486	2	0.972	125.10	
	S7N6	332	2	0.664	115.51	
S8	S8N3	6222	0.5	3.111	18.03	16.15
	S8N4	3646	0.5	1.823	12.07	
	S8N5	7366	0.5	3.683	18.35	
S9	S9N5	4622	0.5	2.311	18.22	26.01
	S9N6	6468	0.5	3.234	17.07	
	S9N7	1184	0.5	0.592	42.74	
跨批次平均		2634	-	-	67	67
跨批次標準差		2847	-	-	56	55
跨批次標準差(%)		108	-	-	84	83

表 5.5 經高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片電壓增加情形

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)	高溫高濕與乾燥後各批平均電壓增加(%)
S10	S10N3	1462	1	1.462	4.9	3.8	13.532
	S10N4	1881	1	1.881	5.7	4.4	
	S10N5	639	1	0.639	53.2	41.4	
	S10N6	1520	1	1.52	14.8	12.1	
	S10N7	2094	1	2.094	10.4	6.1	
該批次平均		1519	-	-	18	14	-
該批次標準差		557	-	-	20	16	-
該批次標準差(%)		37	-	-	113	118	-

表 5.6 經高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片電壓增加情形

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)
S3	S3N7	644.5	4	2.578	345.54	329.21
S4	S4N2	2934	0.5	1.467	139.67	127.61
跨批次平均		1789	-	-	243	228
跨批次標準差		1619	-	-	146	143
跨批次標準差(%)		90	-	-	60	62

5.2.2 高溫高濕 15 天後乾燥 5 天強度測試

表 5.7 為高溫高濕 15 天後乾燥 5 天老化試片強度，該批次 S10 原始平均破壞強度為 7926N，經過老化實驗後，其試片平均強度為 7812N，老化影響平均強度下降 1.44%，顯然短天期的高溫高濕老化實驗，對於強度上的影響不大。

表 5.7 高溫高濕 15 天乾燥 5 天後試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	該批次試片原始強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度影響(%)
S10	S10N3	8280	7926	4.5	-1.44
	S10N4	7454		-6	
	S10N5	7793		-1.7	
	S10N6	8013		1.1	
	S10N7	7520		-5.1	
該批次平均破壞負載(N)		7812	-	-	-
該批次標準差(N)		344	-	-	-
該批次標準差(%該批次平均破壞負載)		4.40	-	-	-

5.2.3 高溫高濕 30 天乾燥 5 天強度測試

表 5.8 為高溫高濕 30 天後乾燥 5 天試片強度、原批次試片強度、老化影響強度百分比。S1~S4 批次經過老化實驗後，強度下降幅度大，而批次 S4 強度下

降幅度與批次 S1~S3 來的低，因為批次 S4 整批試片的強度一致性比起其他批次來的糟糕，所以導致後老化後的數據會有所差異。端看 S1~S3 批次試片，其強度下降幅度落在-10.3~-12.4%，而這三批片老化後平均破壞強度的跨批次標準差為 2.6%，這也說明了其下降的幅度是蠻一致的。

表 5.8 S1~S4 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	該批次試片原始強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度(%)
S1	S1N4	6517	7024	8018	-18.4	-12.4
	S1N5	7530			-6.1	
S2	S2N4	6813	7078	8206	-17.0	-13.8
	S2N5	6970			-15.1	
	S2N6	7511			-8.5	
	S2N7	7017			-14.5	
S3	S3N1	6475	6741	7511	-13.8	-10.3
	S3N6	7007			-6.7	
S4	S4N4	7127	7323	7603	-6.2	-3.7
	S4N5	7519			-1.1	
跨批次平均破壞負載(N)		7049	7041	-	-	-
跨批次標準差(N)		387	239	-	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		5.5	3.4	-	-	-

表 5.9 仍為高溫高濕 30 天後乾燥 5 天試片強度原批次試片強度、老化影響強度百分比。但批次 S7~S9 與批次 S1~S4 的搭接劑調配參數不同，故不合併討論。搭接劑的調配經過改善後，脫泡的更順利也更完整，使試片經過相同的老化實驗後，強度下降幅度變得更小，雖然 S8N7 試片強度是增加 2.8%，但其增加幅度很小，推測可能為搭接時，該試片強度就偏大。

表 5.9S7~S9 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	該批次試片原始強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度(%)
S7	S7N5	7754	7637	7981	-2.8	-4.3
	S7N7	7520			-5.8	
S8	S8N6	7579	7799	7795	-2.8	0
	S8N7	8018			2.8	
S9	S9N1	8018	7766	8020	0	-3.2
	S9N4	7514			-6.3	
跨批次平均破壞負載(N)		7734	7734	-	-	-
跨批次標準差(N)		237	85	-	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		3.1	1.1	-	-	-

5.2.4 高溫高濕 30 天強度測試

表 5.10 為試片經過高溫高濕 30 天後，直接拉伸的試片強度、原批次試片強度、老化影響強度百分比。S5 批次試片強度整體下降 14.6%，與 S7~S9 批次相比，下降幅度較大原因為其搭接劑調配參數不同。S7~S9 批次試片強度整體下降幅度為-3.6%~-7%，若僅計算該三批實驗，跨批次試片標準差落在 3.4%，經過老化實驗後試片強度下降一致。

表 5.10 高溫高濕 30 天未乾燥試片強度

批次	試片編號	破壞強度 (N)	平均破壞強度 (N)	該批次試片原始破壞強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度(%)
S5	S5N5	6517	6726	7881	-17.3	-14.6
	S5N6	7044			-10.6	
	S5N7	6619			-16	
S7	S7N3	7517	7438	7981	-5.8	-7
	S7N4	7281			-8.8	
	S7N6	7518			-5.8	
S8	S8N3	8535	7965	7795	X	-3.6
	S8N4	7679			-3.6	
	S8N5	7683			-3.5	
S9	S9N5	7849	7569	8020	-2.1	-5.6
	S9N6	7289			-9.1	
跨批次平均		7412	7425	7919	-	-
跨批次標準差(N)		567	517	101	-	-
跨批次標準差		7.7	7.0	1.3	-	-

5.2.5 高溫高濕試片乾燥與未乾燥試片強度比較

表 5.11 為 S7~S9 批次試片經過高溫高濕 30 天後乾燥與未乾燥強度比較。批次 S7 與 S9 乾燥試片的平均破壞強度大於沒有乾燥的試片，分別是增加 2.6%、2.5%，而批次 S8 則是相反，乾燥試片的平均破壞強度小於沒有乾燥的試片，強度下降 2.1%，故推定乾燥與未乾燥試片，在強度上並沒有明顯的差異。

表 5.11 乾燥試片與未乾燥試片強度比較

批次	未乾燥試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	有乾燥試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	該批次試片原始強度(N)
S7	S7N3	7517	7438	S7N5	7754	7637	7981
	S7N4	7281		S7N7	7520		
	S7N6	7518		-	-	-	
S8	S8N3	8538	7967	S8N6	7579	7799	7795
	S8N4	7679		S8N7	8018		
	S8N5	7683		-	-	-	
S9	S9N5	7849	7569	S9N1	8018	7766	8020
	S9N6	7289		S9N4	7514		
跨批次平均破壞負載(N)		7669.3	7657.9	-	7733.8	7733.8	7932.0
跨批次標準差(N)		401.6	275.3	-	236.6	85.4	120.2
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		5.2	3.6	-	3.1	1.1	1.5

5.2.6 高溫高濕 150 天乾燥 5 天強度測試

表 5.12 為高溫高濕 150 天後乾燥 5 天試片強度原批次試片強度、老化影響強度百分比、該批次高溫高濕 30 天試片強度。經過 150 天的高溫高濕後，強度沒有依照高溫高濕 30 天的下降曲線，持續下降，而是如文獻[18]所提到，高溫高濕試片在前面 10 週，強度下降為線性關係，第 12 週以後強度達到穩定值，並不會繼續下降。

表 5.12 高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	該批次試片原始強度(N)	老化強度影響(%)	該批次試片泡水 30 天強度(N)	老化強度影響(%)
S3	S3N7	6019	7511	-19.9	6741	-10.3
S4	S4N2	6519	7603	-14.2	7323	-3.7
跨批次平均破壞負載(N)		6269	-	-	-	-
跨批次標準差(N)		353.6	-	-	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		5.6	-	-	-	-

5.2.7 高溫高濕電壓變化與強度關係

綜觀所有高溫高濕試片，無論是長天期或是短天期試片，還有乾燥後的試片，都有以下類似情形，故採用表 5.13 說明。表格中「X」為實驗過程中，埋入碳纖維複材的銅箔膠帶產生斷裂，故無法取得電性數據。表 5.13 為高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片的電壓變化與強度變化，先觀察經過老化實驗後電壓增加較大的試片 S3N1、S4N4、S7N7，其電壓增加分別為 78%、34.8%、53.2%，其強度下降幅度分別為-13.8%、-6.2%、-5.8%，再看到電壓增加幅度較小試片 S2N5、S4N5、S9N1，其強度下降幅度分別為-15.1%、-1.1%、0%。試片經過高溫高濕相關實驗，導致電壓上升幅度差異甚大，透過多組實驗驗證其電壓增加百分比，無法完全匹配強度下降的比例。

表 5.14、表 5.15、表 5.16，分別為高溫高濕 30 天未乾燥、高溫高濕 15 天乾燥 5 天、高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片，這些不同天期的高溫高濕實驗及高溫高濕後乾燥試片，它們也如上一段落所提及，經過老化實驗後，試片電壓上升的差異甚大，且電壓增加百分比，無法匹配強度下降的比例。

表 5.13 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)	老化實驗後與乾燥後各批平均電壓增加(%)	老化後強度變化(%)
S1	S1N4	2472	0.5	1.236	12.5	11.8	11.8	-18.4
	S1N5	948	2	1.896	X	X		-6.1
S2	S2N4	1836	1	1.836	48.2	44	25.1	-17.0
	S2N5	3083	1	3.083	12.8	10.9		-15.1
	S2N6	852	5	4.26	23.3	20.4		-8.5
	S2N7	273	5	1.365	X	X		-14.5
S3	S3N1	891	4	3.564	84.1	78	78.0	-13.8
	S3N6	X	4	X	X	X		-6.7
S4	S4N4	847	2	1.694	41	34.8	21.9	-6.2
	S4N5	731	2	1.462	10.5	9		-1.1
S7	S7N5	1664	2	3.328	19.6	13.5	33.4	-2.8
	S7N7	1302	2	2.604	67.3	53.2		-5.8
S8	S8N6	2610	0.5	1.305	26.2	24.2	18.3	-2.8
	S8N7	3062	0.5	1.531	22	12.3		2.8
S9	S9N1	8104	0.5	4.052	10.7	10	12.9	0
	S9N4	4490	0.5	2.245	18	15.7		-6.3
跨批次平均		2211	-	-	30.5	26.0	28.8	-7.6
跨批次標準差		1998	-	-	23	21	23	6
跨批次標準差(%)		90.4	-	-	76.4	80.9	79.8	-83.6

表 5.14 高溫高濕 30 天未乾燥試片電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	高溫高濕後各批平均電壓增加(%)	老化後強度變化(%)
S5	S5N5	76.15	20	1.523	110.44	131.76	-17.3
	S5N6	71.95	20	1.439	120.50		-10.6
	S5N7	37.85	20	0.757	164.33		-16
S7	S7N3	1094.5	2	2.189	36.77	92.46	-5.8
	S7N4	486	2	0.972	125.10		-8.8
	S7N6	332	2	0.664	115.51		-5.8
S8	S8N3	6222	0.5	3.111	18.03	16.15	X
	S8N4	3646	0.5	1.823	12.07		-3.6
	S8N5	7366	0.5	3.683	18.35		-3.5
S9	S9N5	4622	0.5	2.311	18.22	26.01	-2.1
	S9N6	6468	0.5	3.234	17.07		-9.1
	S9N7	1184	0.5	0.592	42.74		0
跨批次平均		2634	-	-	67	67	-8
跨批次標準差		2847	-	-	56	55	6
跨批次標準差(%)		108	-	-	84	83	-86

表 5.15 高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻 (ohm)	給定電流 (mA)	原始電壓 (V)	老化實驗後電壓增加 (%)	老化實驗後乾燥完電壓增加 (%)	高溫高濕與乾燥後各批平均電壓增加 (%)	老化後強度變化 (%)
S10	S10N3	1462	1	1.462	4.9	3.8	13.532	4.5
	S10N4	1881	1	1.881	5.7	4.4		-6
	S10N5	639	1	0.639	53.2	41.4		-1.7
	S10N6	1520	1	1.52	14.8	12.1		1.1
	S10N7	2094	1	2.094	10.4	6.1		-5.1
該批次平均		1519	-	-	18	14	-	-1
該批次標準差		557	-	-	20	16	-	4
該批次標準差 (%)		37	-	-	113	118	-	-303

表 5.16 高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻 (ohm)	給定電流 (mA)	原始電壓 (V)	老化實驗後電壓增加 (%)	老化實驗後乾燥完電壓增加 (%)	老化後強度變化 (%)
S3	S3N7	644.5	4	2.578	345.54	329.21	-19.9
S4	S4N2	2934	0.5	1.467	139.67	127.61	-14.2
跨批次平均		1789	-	-	243	228	-17
跨批次標準差		1619	-	-	146	143	4
跨批次標準差 (%)		90	-	-	60	62	-24

5.2.8 高溫高濕總結

在試片電壓變化方面，可以看到從試片放進 60°C 熱水開始，隨著高溫高濕天數增加，電壓也不斷的往上提升，甚至是最長天期的試片，也沒有看到任何改變趨勢的跡象。部分試片經過高溫高濕實驗後，放置至於乾燥箱，進行乾燥，乾燥的第一天可以看到電壓有明顯下降，之後幾天電壓趨於穩定，推斷其試片內部水分以完全蒸發，不再影響電壓變化。經過高溫高濕後的試片電壓上升幅度差異甚大，目前無法掌握其原因。

強度方面，因為搭接劑調配參數有所不同，對於高溫高濕後強度變化有明顯差異，故分成兩大部分討論。圖 5.4 為 S1~S5 批次未高溫高濕試片、高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片與高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片的平均破壞強度，未高溫高濕試片平均破壞強度為 7843N、高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片平均破壞強度為

7049N、高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片平均破壞強度為 6269N，而這下降的趨勢也符合文獻[18]所提及，強度不會是線性的一直下降，而是在一段期間內線性下降，經過一特定期間後，強度達到穩定值，不再因高溫高濕天數增加，使強度下降。

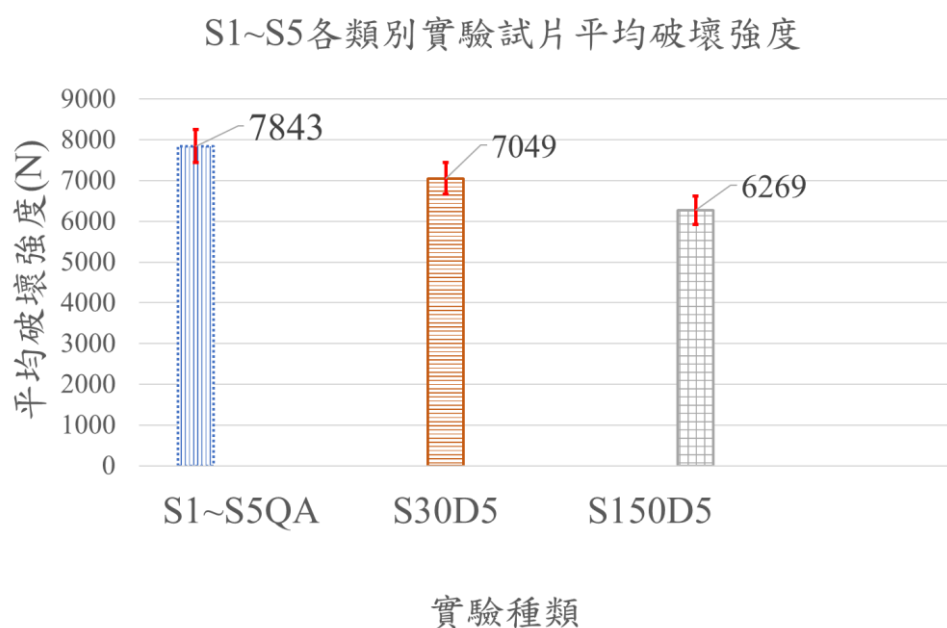


圖 5.4S1~S5 各種實驗類別的試片平均破壞強度

而批次 S7~S11 試片如圖 5.5 所示，分別為未高溫高濕試片平均破壞強度為 7919N、高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片平均破壞強度為 7812N、高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片平均破壞強度為 7734N。搭接劑調配參數經過調整後，試片健康程度提升，雖然未經高溫高濕試片平均強度只有提升 76N，但從高溫高濕 30 天乾燥 5 天這個共同的實驗參數下觀察，S1~S5 平均為 7049N，而 S7~S11 平均為 7734N，這也顯示搭接劑內部氣泡的問題，會影響到試片抵抗高溫高濕環境的能力。

最後提到所有批次試片，高溫高濕前與高溫高濕後電壓上升的比例，並無法完全匹配其試片經過高溫高濕實驗後的強度下降比例，且各個試片電壓上升跨批次標準差高達 81.4%，更凸顯出各個試片差異甚大，尚無法定量其破壞程度。

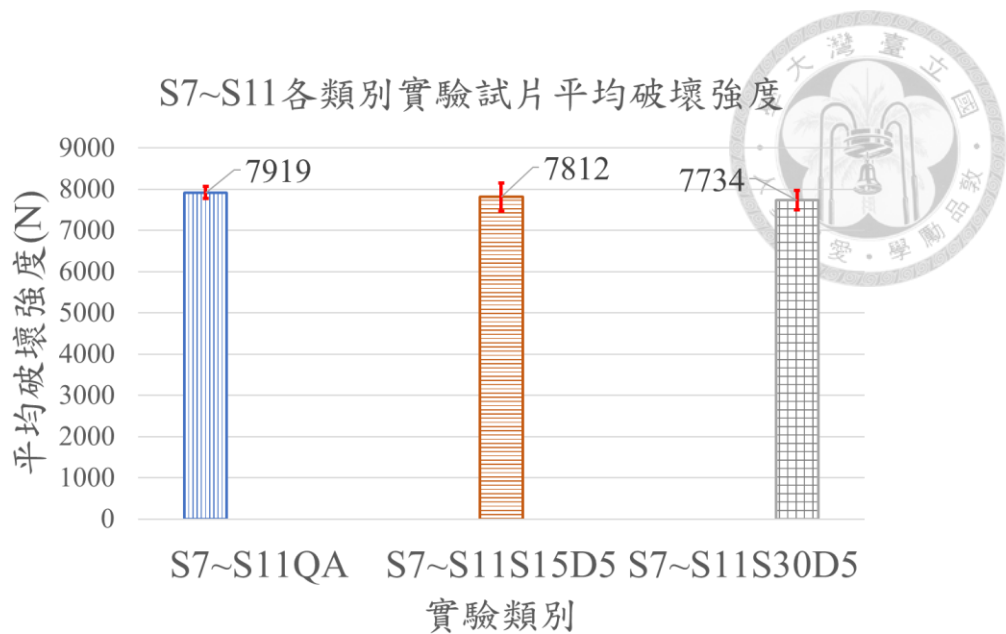


圖 5.5 S7~S11 各種實驗類別的試片平均破壞強度

5.3 高溫低濕

5.3.1 高溫低濕電壓變化

高溫低濕試片升溫階段電壓變化情形如圖 5.6，橫軸為恆溫恆濕溫度($^{\circ}\text{C}$)，縱軸為電壓變化百分比 $\Delta V/V_0(\%)$ 。所有試片都將隨溫度升高，電壓也有所抬升，電壓變化百分比都在 3% 以下，在 50°C 加熱至 60°C 時，試片電壓變化較為明顯。

試片在放置高溫低濕環境與乾燥過程中電壓變化，如圖 5.7，橫軸為時間(天數)，縱軸為電壓變化百分比 $\Delta V/V_0(\%)$ 。電壓在升溫過程電壓有較明顯變化以外，放置恆溫恆濕箱 30 天的過程中，電壓幾乎沒有太大的變化。最後從恆溫恆濕箱取出試片，放置於乾燥箱時，此時溫度已為常溫狀態。電壓會有明顯的抬升情形，推測其試片經過老化實驗後，搭接劑內部導電網絡結構已經改變，再加上從 60°C 回到室溫時，搭接劑受到熱脹冷縮的作用，再次改變搭接劑內部網絡結構。試片在乾燥的過程電壓幾乎沒有變化，原因為試片本身就處於低濕環境，而乾燥箱也同樣屬於低濕度環境，故試片僅受溫度影響電壓變化。

圖 5.8 為長天期恆溫恆濕試片電壓變化與時間關係圖，可以看到即使是長天期的試片，在高溫低濕環境所量測到的試片電壓，依舊沒有太大的變化，而取出乾燥箱後降溫下來，搭接劑一樣受到熱漲冷縮關係，改變其內部導電網絡結構，造成電壓上升。

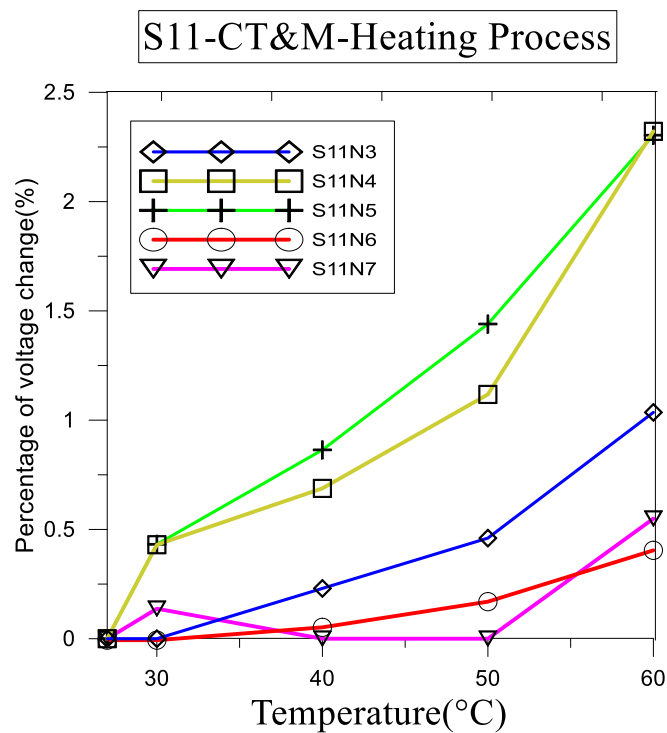


圖 5.6 S11 恆溫恆濕試片升溫階段電壓變化與溫度關係圖

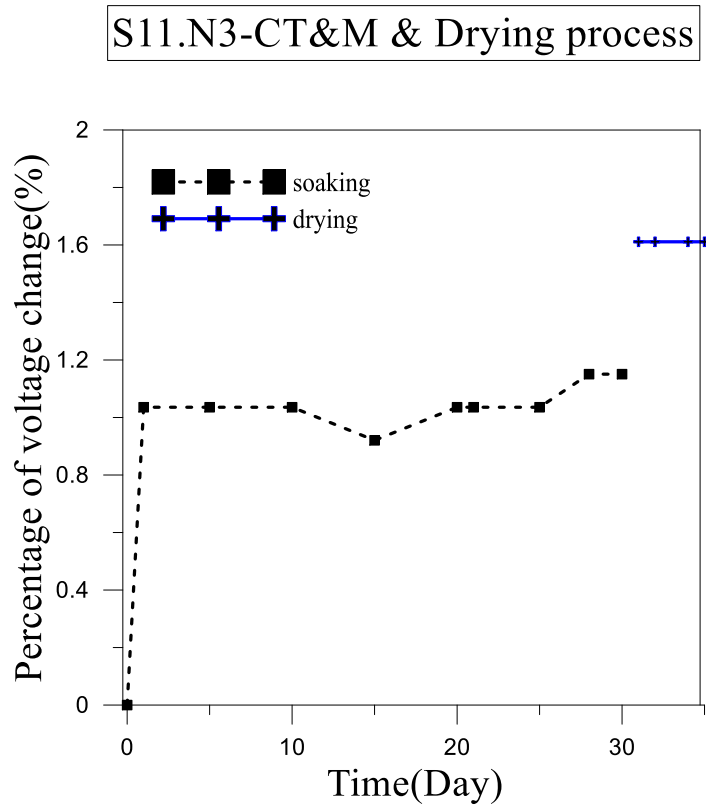


圖 5.7 S11N3 恆溫恆濕與乾燥過程試片電壓變化與時間關係圖

S5.N3-CT&M&Drying Process

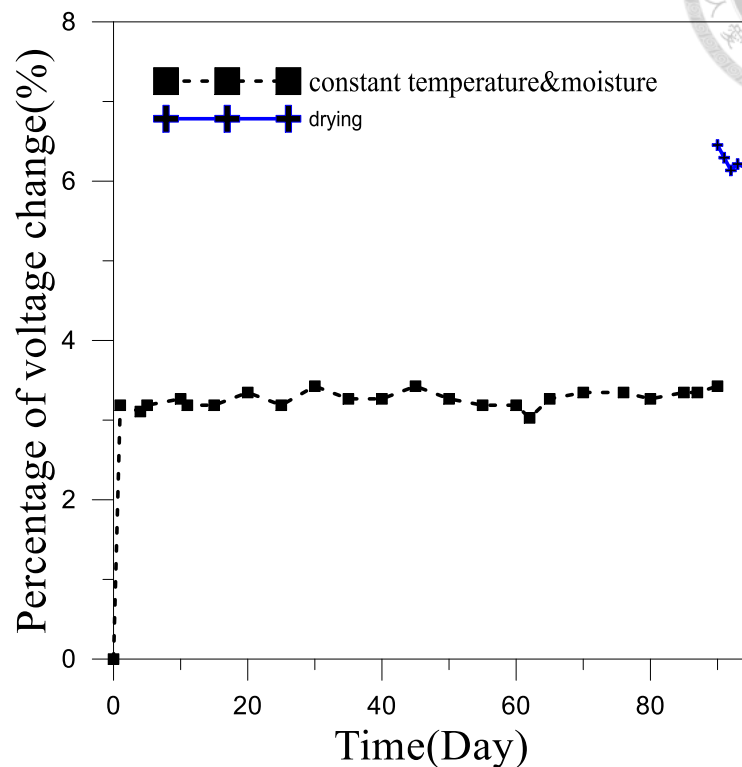


圖 5.8 S5N3 長天期恆溫恆濕與乾燥過程試片電壓變化與時間關係圖

5.3.2 高溫低濕 30 天乾燥 5 天強度測試

S3 與 S4 批次試片，各都有兩片試片進行高溫低濕實驗，其搭接劑為脫泡一次的狀況下，從表 5.17 可以看見在高溫低濕環境 30 天後乾燥 5 天，有三試片強度下降，但降幅最大僅 2.8%，雖有一試片強度提升，但也僅有 0.1%，也說明了搭接劑在這個調配參數下，試片經過老化實驗強度幾乎不太有變化。

然而在搭接劑經過改善調配參數後，批次 S11 有 5 個試片進行高溫低濕實驗，從表 5.19 可以看見僅有一試片強度下降，降幅只有 1.5%，其餘試片強度提升 2.2%~8.3%，該批次實驗經過高溫低濕 30 天後再進行 5 天乾燥，老化後整體平均強度提升 4.3%。



表 5.17S3 與 S4 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	該批次試片原始破壞強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度(%)
S3	S3N4	7296	7408	7510	-2.80	-1.36
	S3N5	7519			0.10	
S4	S4N6	7519	7510	7602	-1.10	-1.22
	S4N7	7500			-1.30	
跨批次平均破壞負載(N)		7459	7459	7556	-	-
跨批次標準差(N)		108.7	72.1	65.1	-	-
跨批次標準差(%跨批次平均破壞負載)		1.5	1.0	0.9	-	-

表 5.18S11 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	平均破壞強度(N)	該批次試片原始破壞強度(N)	老化強度影響(%)	老化平均強度(%)	跨批次平均破壞負載(N)及標準差(%)
S11	S11N3	8531	8214	7874	8.3	4.3	8214/4.0
	S11N4	7755			-1.5		
	S11N5	8509			8.1		
	S11N6	8046			2.2		
	S11N7	8230			4.5		

5.3.3 高溫低濕 90 天乾燥 5 天強度測試

表 5.19 為長天期高低濕試片強度，批次 S5 仍然屬於脫泡一次的搭接劑。與 S3 和 S4 批次的高溫低濕 30 天試片相比，雖然僅有兩個試片數據，但可以看到經過長天期的高溫影響，試片強度有明顯下降，分別下降了 4.7%與 10.9%。

表 5.19 高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片強度

批次	試片編號	破壞強度(N)	該批次試片 原始強度(N)	老化強度 影響(%)	老化平均強 度影響(%)
S5	S5N3	7513	7881	-4.7	-7.81
	S5N4	7018		-10.9	
該批次平均 破壞負載(N)		7265.5	-	-	-
該批次標準差(N)		350	-	-	-
該批次標準差 (%該批次平均破壞負載)		4.82	-	-	-

5.3.4 高溫低濕電壓變化與強度關係

表 5.20 為所有高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係，僅有溫度影響試片的電壓下，可以看到各個試片電壓較為集中，除了一試片電壓下降低於原始電壓以外，其餘試片皆為上升情形，而增加幅度約為 5%以內，相較於高溫高濕試片，雖然高溫低濕試片電壓增加比例離散度較小，但電壓增加幅度也沒有跟強度的上升與下降相對應。表 5.21 為高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片電壓變化與強度關係，長天期試片亦如同上述。

表 5.20 高溫低濕 30 天乾燥 5 天電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)	老化後強度變化(%)
S3	S3N4	542	4	2.166	0.14	-5.26	-2.8
	S3N5	1270	1.75	2.223	1.80	2.43	0.1
S4	S4N6	271	4	1.085	1.01	2.40	-1.1
	S4N7	287	4	1.146	0.44	0.87	-1.3
S11	S11N3	87	10	0.869	1.15	1.61	8.3
	S11N4	116	10	1.163	2.49	4.82	-1.5
	S11N5	139	10	1.389	2.38	3.17	8.1
	S11N6	53	10	0.534	1.50	2.81	2.2
	S11N7	73	10	0.728	0.69	1.79	4.5
跨批次平均		315	-	-	1.288	1.625	1.833
跨批次標準差		390	-	-	0.825	2.81	4.22
跨批次標準差(%)		123.7	-	-	64.0	173.0	230.1

表 5.21 高溫低濕 90 天乾燥 5 天電壓變化與強度關係

批次	試片編號	試片原始電阻(ohm)	給定電流(mA)	原始電壓(V)	老化實驗後電壓增加(%)	老化實驗後乾燥完電壓增加(%)	老化後強度變化(%)
S5	S5N3	76.3	10	0.763	4.063	6.553	-4.7
	S5N4	122.5		1.225	3.426	6.135	-10.9
該批次平均		99	-	-	3.74	6.34	-7.80
該批次標準差(ohm)		33	-	-	0.45	0.30	4.38
該批次標準差(%)		32.9	-	-	12.03	4.66	-56.21

5.3.5 高溫低濕總結

有別於高溫高濕實驗試片，高溫低濕試片電壓僅有在加溫過程，能明顯看到電壓上升情形，在高溫低濕 30 天的過程中，電壓變化幅度不大。試片取出恆溫恆濕箱時，開始慢慢降溫，此時試片搭接處內部結構已產生不可逆的改變，造成電壓變化率不為 0。

在搭接劑僅有脫泡一次的試片當中，放置於高溫低濕環境 30 天乾燥 5 天，對試片強度上，並沒有明顯增強或減弱，平均破壞強度僅下降 1.29%，當高溫低濕時間拉長至 90 天時，強度上有明顯下降，平均破壞強度下降 7.81%。而搭接劑調配參數經過改善後，試片放置於高溫低濕環境 30 天乾燥 5 天，試片整體平均

強度增加 4.3%。

雖然電壓變化幅度較小，但目前還無法透過它，來掌握試片強度的變化。另外試片在進行高溫低濕實驗時，電壓的變化趨勢，各個試片趨勢相近，僅差於變化的量不同，故也無法透過不同電壓變化趨勢來掌握試片破壞強度。



5.4 循環加載卸載拉伸試驗

利用循環加載卸載試驗來取得試片破壞強度，以及試驗過程中，觀察試片電性變化。試驗過程前期為加載 1kN 後，卸載回 500N 與 50N，負載超過 3kN 後則是每加載 500N 後，回 500N 與 50N，直至試片斷裂或失效。

5.4.1 電性變化

循環加載卸載拉伸實驗之電壓監測，方為利用電源供應器，給試片一定電流，接收其輸出電壓訊號，並將其換算成電阻變化，推估試片破壞程度。本實驗將所有試片電性變化圖，以電壓變化百分比 $\Delta V/V_0(\%)$ 和負載(kN)作圖呈現。

試片進行拉伸過程，會因為試片拉長與膠合接口處發生損傷情形，造成電壓有所變化，因此利用循環加載卸載試驗，紀錄試片卸載回 50N 與 500N 時的電壓變化，此時試片都是固定在相同的長度下，所得到的電壓變化將完全都是接口損傷所造成的電壓變化。為了方便觀察每次卸載回固定負載值的電性結果，以卸載回 50N 和 500N 的電壓變化百分比作圖討論。

圖 5.9 為 S9N2-QA 循環加載卸載拉伸試驗過程中的負載與電壓變化百分比，右縱軸為負載(kN)，左縱軸為電壓變化百分比 $\Delta V/V_0(\%)$ ，橫軸為試驗時間(s)。可觀察到電壓變化百分比的趨勢與負載同向，隨著每次加載的負載越高，電壓變化百分比也隨負載增加而上升，卸載回 50N 與 500N 時，電壓變壓百分比低於 10%。

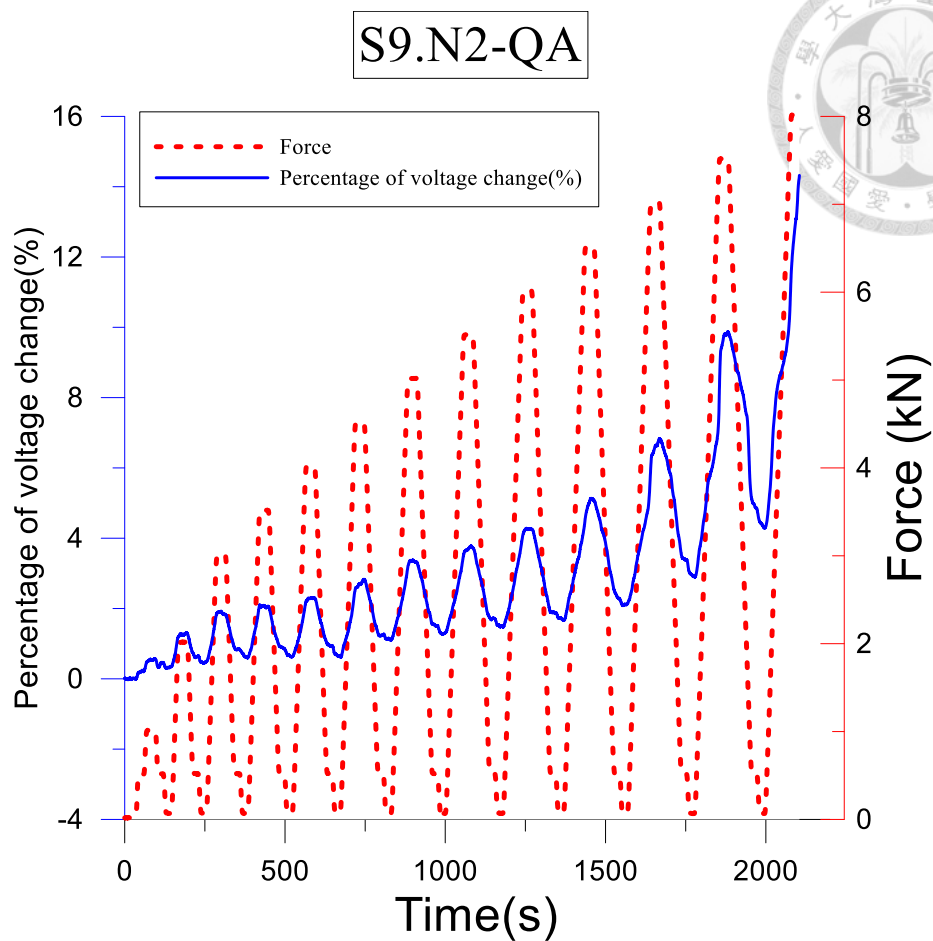


圖 5.9 S9N2-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖

圖 5.10 為 S10N1-QA 循環加載卸載拉伸試驗過程中的負載與電壓變化百分比，觀察其電壓變化與圖 5.9 相同的地方為整體電壓是往上升。但不同的是，S10N1-QA 這一類試片，在拉伸到某一負載時電壓突然陡升，即使卸載回 50N 與 500N 時，電壓變化已經遠超過於 10%。

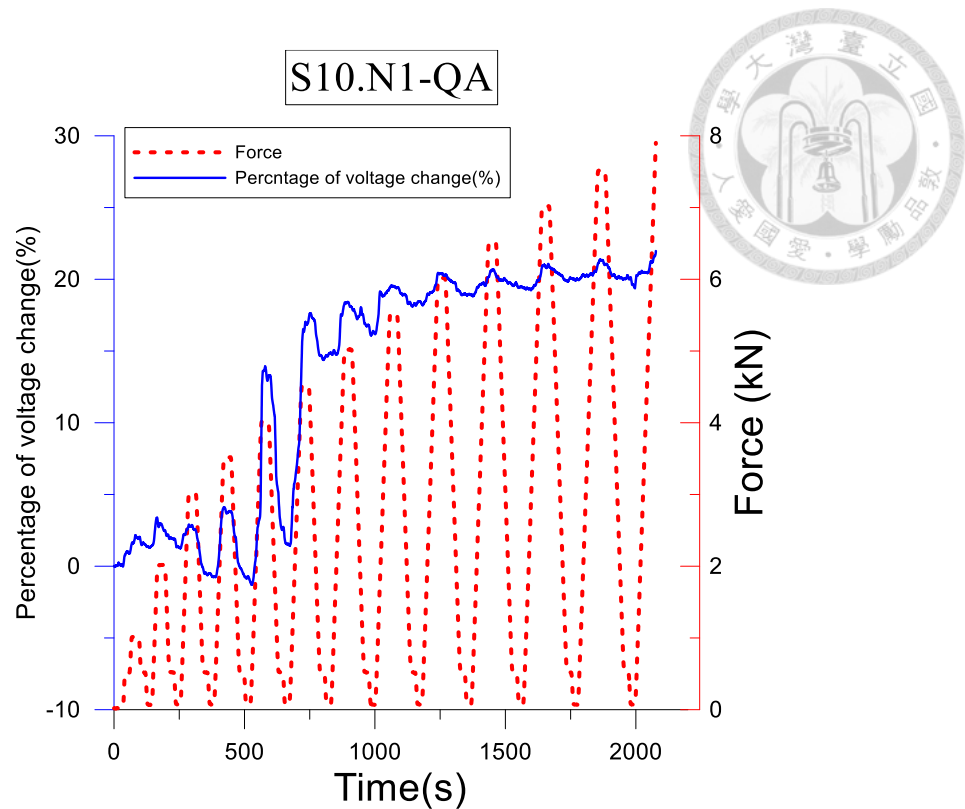


圖 5.10 S10N1-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖

圖 5.11 為 S8N2-QA 循環加載卸載拉伸試驗過程中的負載與電壓變化百分比，觀察其電壓變化與圖 5.9、圖 5.10 截然不同，在進行拉伸時，電壓就不斷的下降，直至試片破壞前一刻，電壓才有抬升的現象。

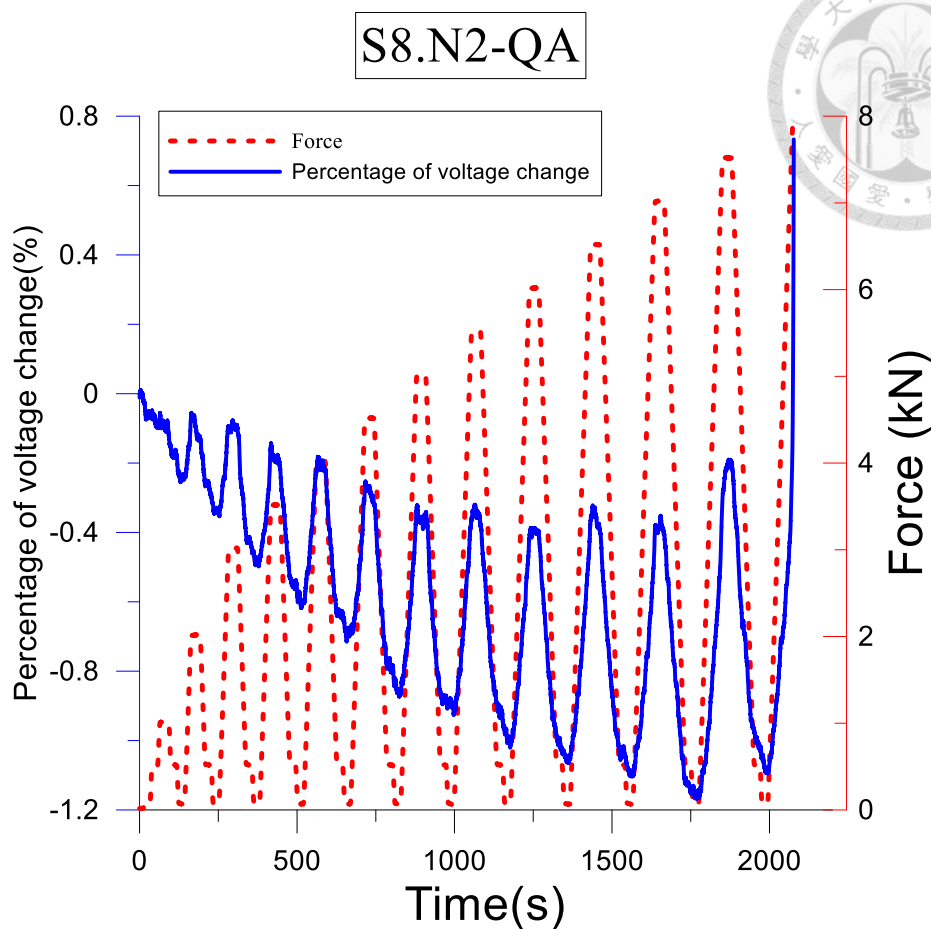


圖 5.11S8N2-QA 負載與電壓變化百分比-時間圖

本實驗分三大種類試片，一為沒有經過任何老化的試片(QA)，接下來為試片浸泡於 60°C 熱水若干天試片(SNDN)，最後則是放置於高溫低濕環境(30%RH, 60°C)若干天試片(CT&MNDN)。而這三大類試片，在循環加載卸載拉伸實驗時，也都有上述所提到三種電壓變化情形，表 5.22 顯示出三種不同實驗的試片，進行循環加載卸載拉伸試驗，卸載回 50N 與 500N 時，電壓變化百分比都小於 10%，而電壓上升超過 10%與電壓整體趨勢下降佔少數。

表 5.23 為 QA 試片進行循環加載卸載拉伸試驗加載至各破壞負載後，卸載回 500N 之電壓變化百分比，表 5.24、表 5.25、表 5.26、表 5.27、表 5.28 為高溫高濕與高溫低濕不同天期試片的循環加載卸載拉伸試驗數據，表中的「X」為實驗操作時，用來讀取電性資料的 NI DAQ 沒有讀取到數據，故該欄位無電性數據。因三大種類試片都有相似的電壓變化趨勢，故僅利用 QA 試片做討論，而回

50N 與回 500N 的電壓變化百分比相近，擇一討論即可。從表 5.23 觀察到，雖然大部分試片電壓變化趨勢為上升，且卸載回 500N 時，電壓變化百分比低於 10%，但各試片之間電壓變化百分比的標準差皆超過 100%，故此法僅適用於定性分析，不太適合定量分析試片結構破壞程度。

表 5.22 不同種類試片卸載時電壓變化情形

試片種類	卸載時電壓變化		
	$\Delta V/V_0(\%)<10\%$	$\Delta V/V_0(\%)>10\%$	整體趨勢下降
QA	12	2	6
SNDN	19	6	8
CT&MNDN	10	1	0

表 5.23QA 試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)												
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
S1N6	0.01	0.27	0.07	0.22	0.50	0.57	0.94	0.91	0.68	0.68	1.34	2.76	
S1N7	0.31	0.43	0.84	1.07	1.47	2.49	3.23	3.66	4.29	5.04	5.69	7.66	
S2N1	0.08	-0.50	-0.89	-1.25	-1.36	-1.14	X	X	X	-4.61	-4.87	-5.23	
S2N3	0.35	1.25	1.80	2.60	2.72	2.62	9.41	11.97	11.87	20.61	25.46	29.46	
S3N2	-0.08	-0.19	-0.22	-0.56	-0.55	-0.50	-0.86	-0.98	-1.48	-1.49	-1.75		
S3N3	0.81	1.28	1.51	1.40	1.74	3.03	3.18	3.68	4.78	10.80	12.44		
S4N1	-0.22	-0.59	-1.00	-1.42	-1.70	-1.89	-2.31	-2.67	-3.15	-3.59			
S4N3	-0.06	-0.56	-0.97	-0.99	-1.12	-0.85	-1.37	-1.45	-1.26	-1.18	-1.17	-0.97	0.22
S5N1	0.02	0.16	0.33	0.39	0.69	0.71	0.65	0.63	0.63	0.78	1.12	1.63	
S5N2	0.09	0.40	0.50	0.64	1.21	1.18	0.90	1.26	0.86	1.18	0.84	0.78	
S7N1	-0.06	-0.22	-0.25	-0.18	-0.32	-0.32	-0.15	-0.32	0.03	0.38	0.77	1.06	
S7N2	-0.07	-0.15	-0.20	-0.21	-0.26	-0.19	-0.41	-0.37	-0.07	-0.18	-0.13	0.26	
S8N1	0.11	-0.09	-0.16	-0.64	-0.44	-0.71	-0.60	-1.02	-1.20	-0.84	-0.49	0.85	
S8N2	-0.24	-0.34	-0.49	-0.61	-0.69	-0.86	-0.90	-1.00	-1.05	-1.10	-1.15	-1.09	
S9N2	0.33	0.46	0.62	0.65	0.65	1.13	1.29	1.49	1.69	2.12	2.94	4.34	
S9N3	-0.26	0.87	1.26	0.92	1.40	2.12	2.17	2.56	2.74	2.95	4.37	2.96	
S10N1	1.35	1.32	-0.74	-0.85	1.54	14.83	16.30	18.40	18.94	19.46	19.99	19.54	
S10N2	-0.33	0.50	-1.22	-1.70	-2.05	-2.48	-2.65	-2.42	-2.29	-2.22	-2.42	-1.54	
S11N1	0.36	0.51	0.65	0.83	1.04	1.23	1.51	1.75	2.01	1.95	2.19	2.72	
S11N2	-0.21	-0.28	-0.47	-0.76	-0.99	-1.11	-1.25	-1.43	-1.64	-1.74	-1.87	-1.05	
平均電壓變化百分比(%)	0.12	0.24	0.04	-0.03	0.19	1.10	1.70	2.02	2.12	2.71	3.70	4.16	0.22
標準差(%)	0.41	0.63	0.90	1.11	1.33	3.77	4.68	5.42	5.58	7.17	8.17	8.95	-
標準差(%平均電壓百分比)	349.61	261.38	2020.4	-4019	696.96	344.11	276.17	268.3	263.46	264.45	220.66	214.83	-

表 5.24 高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後
卸載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)											
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
S1N4	-0.283	-0.166	0.056	0.126	0.439	0.458	0.648	0.783	1.448			
S2N4	-3.902	-3.867	X	X	X	X	X	X	11.285	19.856		
S2N5	-0.006	-0.061	0.001	0.101	0.009	0.086	0.030	0.047	0.123	0.666		
S2N6	0.237	0.530	0.807	0.957	1.333	1.881	2.153	2.417	2.734	3.141	6.631	
S2N7	0.210	0.399	0.441	0.529	0.625	0.704	0.893	1.445	1.903	2.857		
S3N1	1.348	12.426	5.283	12.443	39.736	40.308	42.388	44.467	44.758			
S4N4	-0.110	-0.293	-0.408	-0.524	-0.694	-0.700	-0.730	-0.598	-0.452	0.413	2.888	
S4N5	0.060	-0.097	-0.413	-0.424	-0.555	-0.513	-0.275	3.630	3.990	3.175	6.972	
S7N5	0.217	0.348	0.402	0.261	0.222	0.241	0.283	0.607	1.303	3.074	5.014	5.404
S7N7	0.030	0.094	0.100	0.082	0.122	0.205	0.253	0.373	0.799	1.638	2.867	
S8N6	-0.019	-0.120	-0.262	-0.295	-0.394	-0.354	-0.305	-0.433	-0.408	-0.380	-0.389	0.070
S8N7	-0.455	-0.915	-1.192	-0.935	-1.464	-1.477	-1.468	-1.247	-1.871	-1.630	-1.839	-2.113
S9N1	0.076	0.200	0.527	0.788	0.985	1.097	1.304	1.963	2.254	2.480	2.892	3.531
S9N4	0.024	0.039	-0.516	-0.679	-0.335	-0.261	-0.392	-0.882	-0.406	-0.442	-0.345	
平均電壓變化百分比(%)	0.134	1.046	0.397	1.025	3.299	3.435	3.678	4.316	4.561	1.363	2.743	1.723
標準差(%)	0.424	3.604	1.635	3.643	11.500	11.645	12.228	12.728	12.764	1.720	3.134	3.380
標準差(%平均電壓百分比)	315.519	344.604	411.398	355.303	348.583	339.024	332.475	294.923	279.889	126.173	114.229	196.141

表 5.25 高溫高濕 30 天未乾燥試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後卸
載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)												
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
S5N5	0.183	0.072	0.431	0.476	0.771	1.100	1.350	2.038	2.541				
S5N6	0.219	0.135	0.273	0.673	0.646	1.133	1.608	1.279	1.274	1.382	1.666		
S5N7	-0.478	-1.090	-1.704	-2.643	-3.274	-3.744	-4.055	-4.401	-4.695	-4.486			
S7N3	0.132	0.191	0.264	0.418	0.998	2.096	6.102	8.965	11.787	15.538	69.208		
S7N4	-0.127	-0.410	-0.986	-1.338	-1.758	-2.224	-2.642	-2.940	-3.270	-3.427	-3.558		
S7N6	0.575	3.365	5.799	6.511	8.859	9.801	13.220	13.801	15.839	20.675	24.337		
S8N3	0.124	0.209	0.360	0.571	0.711	1.097	1.524	2.001	2.665	3.122	3.797	4.742	6.029
S8N4	0.041	0.015	-0.269	-0.108	-0.319	-0.212	-0.356	-0.019	-0.188	-0.194	-0.227	-0.201	
S8N5	0.068	-0.044	0.043	0.032	0.055	0.148	0.132	0.226	0.288	0.357	0.642	1.232	
S9N5	-0.318	-0.915	-1.457	-1.969	-2.500	-2.472	-2.558	-3.111	-3.256	-2.611	-2.903	-0.884	
S9N6	0.063	0.044	0.054	0.070	0.084	0.121	0.194	0.256	0.384	0.533	1.155		
S9N7	0.558	1.246	5.857	11.746	12.346	14.713	14.071	17.678	17.968	25.102	29.795	34.577	
平均電壓變化百分比(%)	0.087	0.235	0.722	1.203	1.385	1.796	2.383	2.981	3.445	5.090	12.391	7.893	6.029
標準差(%)	0.305	1.149	2.490	4.010	4.578	5.283	5.868	6.904	7.562	10.319	23.033	15.074	-
標準差(%平均電壓百分比)	351.849	488.974	344.866	333.222	330.557	294.096	246.286	231.588	219.527	202.728	185.876	190.976	-

表 5.26 高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後

卸載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)												
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
S10N3	0.006	-0.145	-0.061	-0.147	-0.341	-0.264	-0.490	-0.322	1.716	7.523	7.602	8.101	9.604
S10N4	0.259	0.143	-0.030	-0.837	-0.882	-0.126	2.697	6.074	11.508	17.871	16.142		
S10N5	-0.840	-0.991	-0.998	-1.314	-1.246	-1.487	-1.859	-1.452	-0.106	0.425	2.506	5.114	
S10N6	-0.065	0.278	0.811	0.534	0.435	0.785	0.640	3.384	3.734	3.819	5.812	4.493	
S10N7	0.005	-0.237	-0.407	-0.602	-1.190	-0.906	-0.979	-1.248	-0.921	-0.960	-1.942		
平均電壓變化百分比(%)	-0.127	-0.190	-0.137	-0.473	-0.645	-0.400	0.002	1.287	3.186	5.736	6.024	5.902	9.604
標準差(%)	0.417	0.494	0.657	0.703	0.702	0.857	1.756	3.310	4.986	7.536	6.722	1.929	-
標準差(%平均電壓百分比)	-329.008	-259.461	-479.855	-148.614	-108.862	-214.331	93168	257.182	156.476	131.391	111.587	32.686	-

表 5.27 高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後

卸載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)												
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
S3N4	0.165	0.431	0.639	0.683	0.808	3.232	3.636	3.429	4.267	5.025	8.779		
S3N5	0.025	0.044	0.086	0.091	0.091	0.117	0.136	0.172	0.147	0.283	0.326		
S4N6	0.017	0.202	0.294	0.261	0.290	0.413	0.636	1.100	1.527	2.705	9.045		
S4N7	0.015	0.015	0.022	0.037	0.021	0.083	0.147	0.201	0.199	0.266	0.251		
S11N3	-0.045	-0.031	-0.049	-0.048	-0.111	-0.237	-0.239	-0.327	-0.449	-0.507	0.069	0.629	
S11N4	-0.100	-0.049	0.075	-0.049	-0.091	-0.064	-0.098	-0.215	-0.171	-0.149	-0.098	0.201	
S11N5	-0.015	0.770	1.483	1.652	1.799	2.063	2.469	2.407	2.669	2.792	2.553	3.114	4.759
S11N6	-0.044	-0.032	-0.006	-0.047	-0.073	-0.079	-0.046	0.075	0.476	0.717	1.450	2.577	7.732
S11N7	-0.013	0.034	0.215	0.369	0.846	1.389	2.594	4.463	6.361	7.432	8.856	10.563	13.750
平均電壓變化百分比(%)	0.06	0.17	0.26	0.27	0.30	0.96	1.14	1.23	1.54	2.07	4.60	3.42	8.75
標準差(%)	0.07	0.19	0.28	0.29	0.36	1.52	1.68	1.53	1.93	2.28	4.98	4.18	4.58
標準差(%平均電壓百分比)	131.54	110.09	106.99	109.35	117.62	158.21	147.60	124.92	125.74	110.13	108.26	122.42	52.37

表 5.28 高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片循環加載卸載拉伸加載至各破壞負載後

卸載回 500N 之電壓變化百分比表

試片編號	回500N前負載(kN)										
	1	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
S5N3	0.030	0.005	-0.022	-0.028	-0.047	0.043	0.157	0.341	0.453	0.630	1.045
S5N4	0.109	0.174	0.238	0.258	0.284	0.336	0.529	0.920	1.440	2.154	
平均電壓變化百分比(%)	0.07	0.09	0.11	0.12	0.12	0.19	0.34	0.63	0.95	1.39	1.05
標準差(%)	0.06	0.12	0.18	0.20	0.23	0.21	0.26	0.41	0.70	1.08	-
標準差(%平均電壓百分比)	80.66	133.32	169.63	175.70	197.28	109.56	76.75	64.97	73.75	77.44	-



5.5 破斷面觀察結果

5.5.1 試片切面氣泡

圖 5.12 為搭接劑製作過程，僅經過一次脫泡程序所製作之試片切面，可以明顯看到切面各處都有孔洞的狀況，因此希望透過調整脫泡次數，減少搭接劑內部氣孔。圖 5.13 為經過三次脫泡程序所製作之試片切面，可以明顯看到氣孔大幅減少，故批次 S5 之後，試片製作都以三次脫泡。

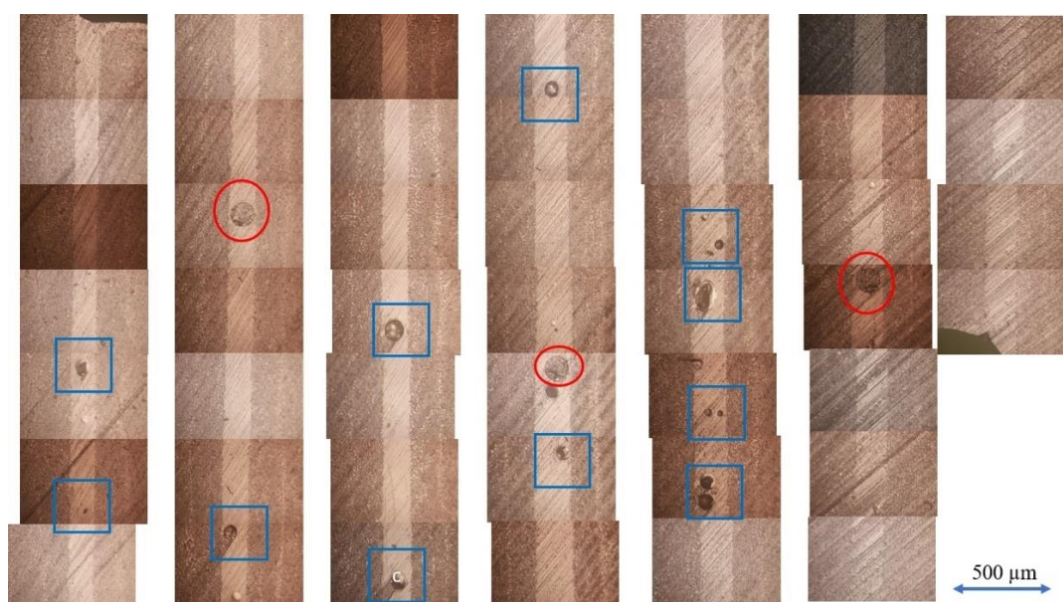


圖 5.12 金相顯微鏡倍率 200X，搭接劑脫泡一次之試片切面(紅色圓圈處為光纖，藍色方框處為氣泡)

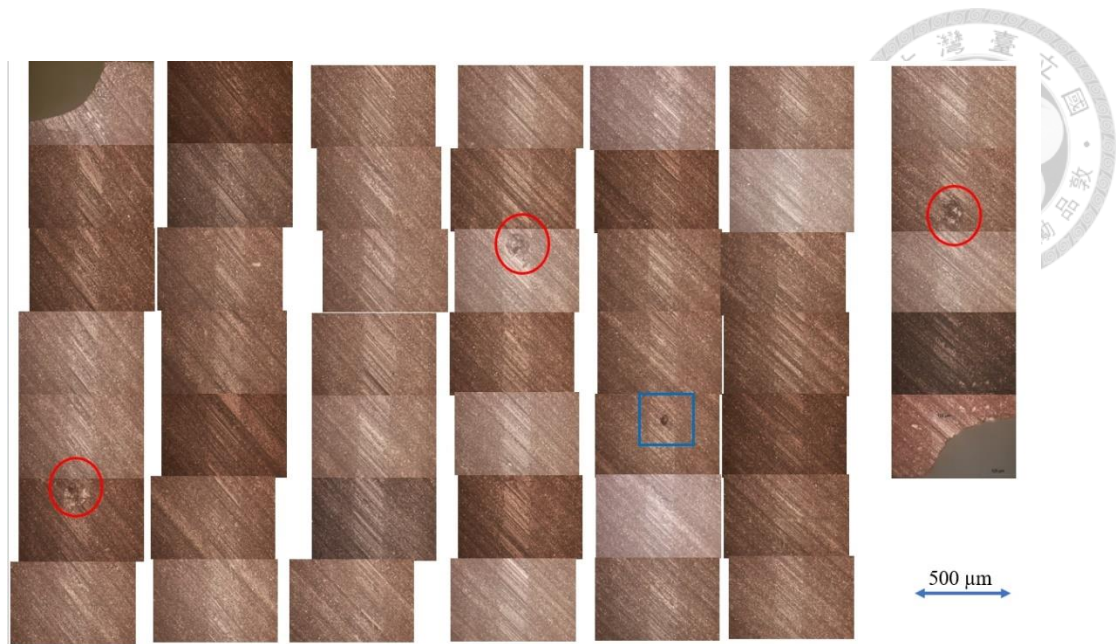


圖 5.13 金相顯微鏡倍率 200X，搭接劑脫泡三次之試片切面(紅色圓圈處為光纖，藍色方框處為氣泡)

5.5.2 破斷面觀察

本研究使用國立臺灣大學生物資源暨農學院共同儀器中心的電子顯微鏡進行膠合接口破斷面的微觀觀察。觀察的重點為未經過老化實驗試片、經過高溫高濕試片以及高溫低濕試片，三種不同實驗的情況下，試片的破壞機制。

圖 5.14 為側向觀察試片破斷面結果，可以看到未經過老化實驗試片的情形，搭接劑上有明顯的脆性斷裂之放射狀痕跡，且搭接劑與複材纖維膠合情況良好。圖 5.15 為高溫高濕短天期試片之側向觀察破斷面圖，可以明顯看到搭接劑底部的複材纖維，有纖維拔出現象(Fiber Pulled-Out)，將倍率再放大仔細觀察纖維拔出部分(圖 5.16)，可以看到複材纖維上還披覆複材本身的樹脂。圖 5.17 為高溫高濕長天期試片之俯視觀察破斷面圖，可以看到另一試片上的複材纖維剝離(纖維介面弱化)，黏附在這個試片上的搭接劑，將倍率再放大仔細觀察纖維拔出部分(圖 5.18)，可以看到複材纖維被拔出的部分，表面上是光滑的，沒有黏附樹脂，還有圖左側的部分，是樹脂嚴重塑化現象。圖 5.19 為高溫低濕短天期試片之側

向觀察破斷面，將其倍率提升到 500 與 1000 倍(圖 5.20)，可以更明顯觀察到，跟高溫高濕試片有明顯對比，高溫低濕試片搭接劑斷裂時，並沒有將複材上的纖維剝落，僅有黏附一些複材本身的樹脂於搭接劑上。圖 5.21 為高溫低濕長天期試片側向觀察搭接劑，將其倍率提升到 500 與 1000 倍(圖 5.22)，可以明顯觀察到，與高溫低濕短天期試片相同的部分是搭接劑斷裂的時候，沒有將複材纖維給拔出，所以搭接劑上都沒有纖維，不同的地方是，短天期試片的搭接劑有黏附複材本身的樹脂，長天期的試片則沒有這個現象。

(側視圖)

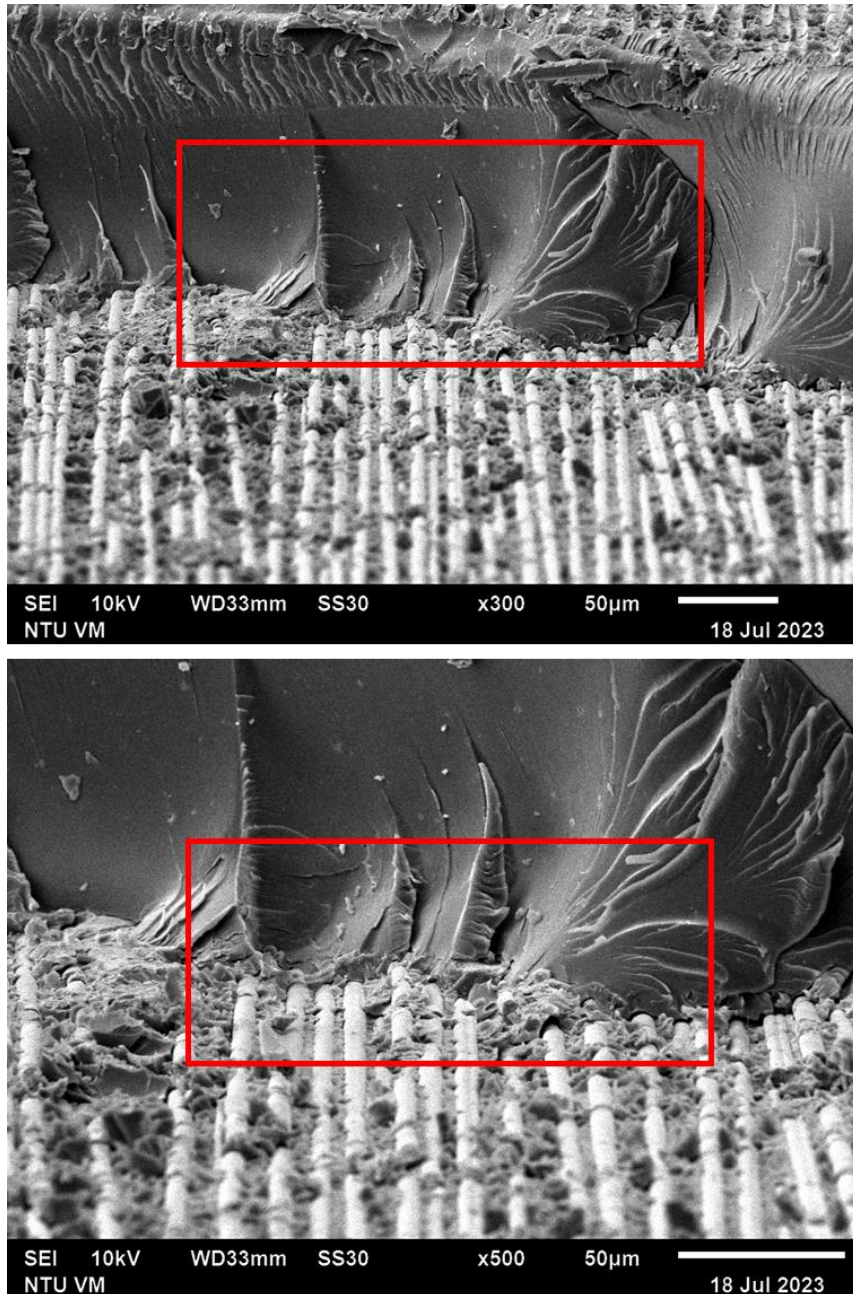
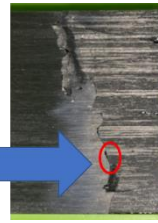


圖 5.14 未經老化實驗試片搭接劑與碳纖維膠合情況&搭接劑脆性斷裂的放射
狀痕跡之 SEM 圖



(側視圖)

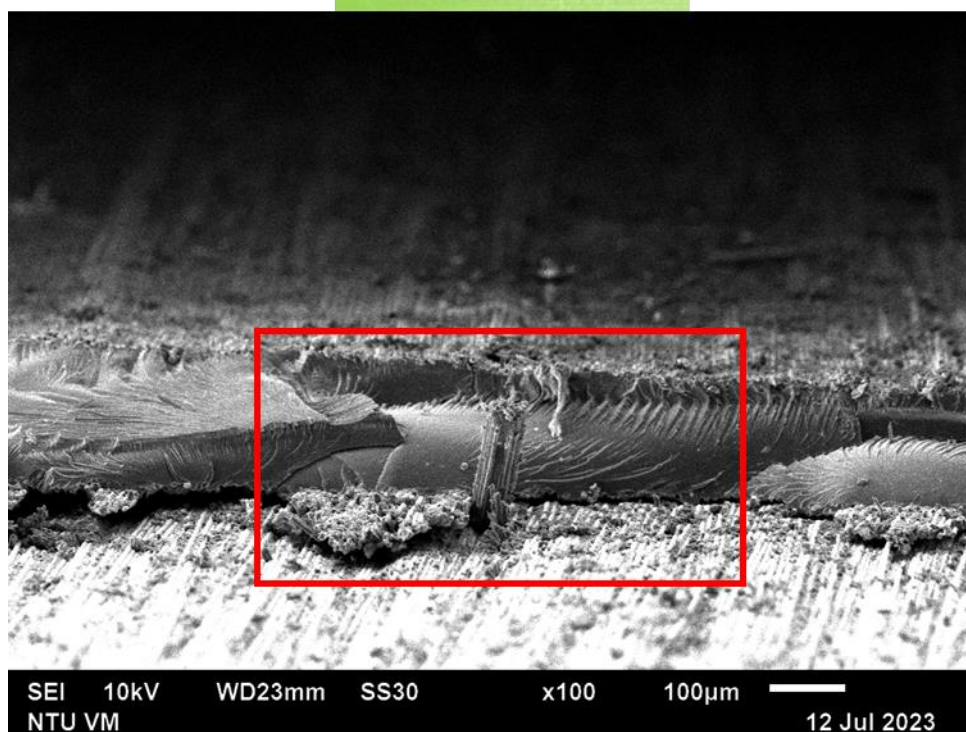
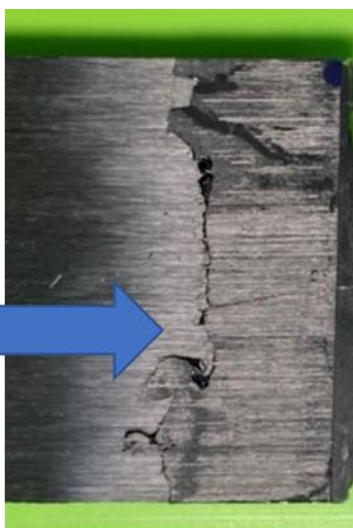


圖 5.15 高溫高濕短天期試片破斷面觀察

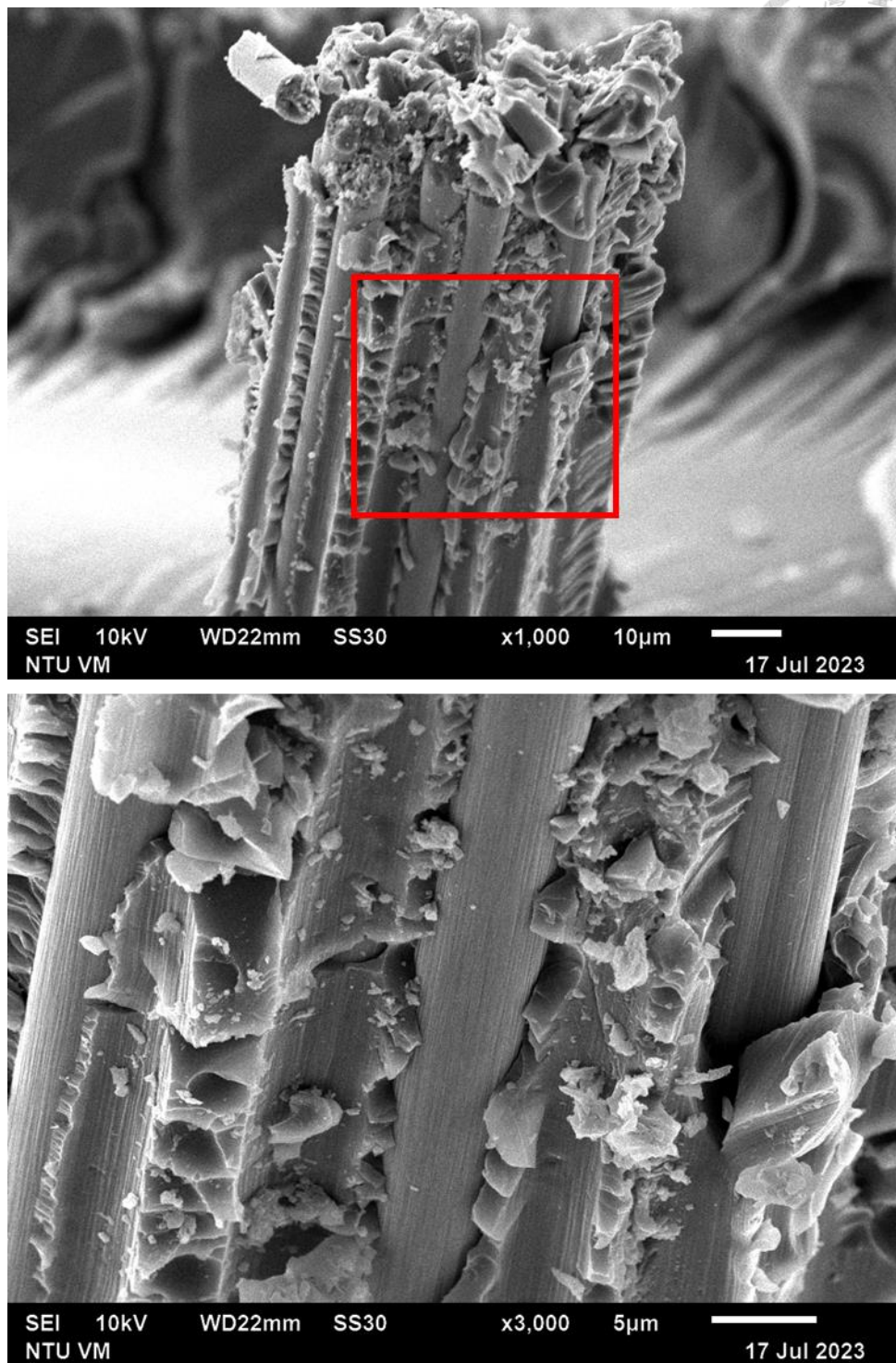


圖 5.16 高溫高濕短天期試片纖維拔出現象

(俯視圖)

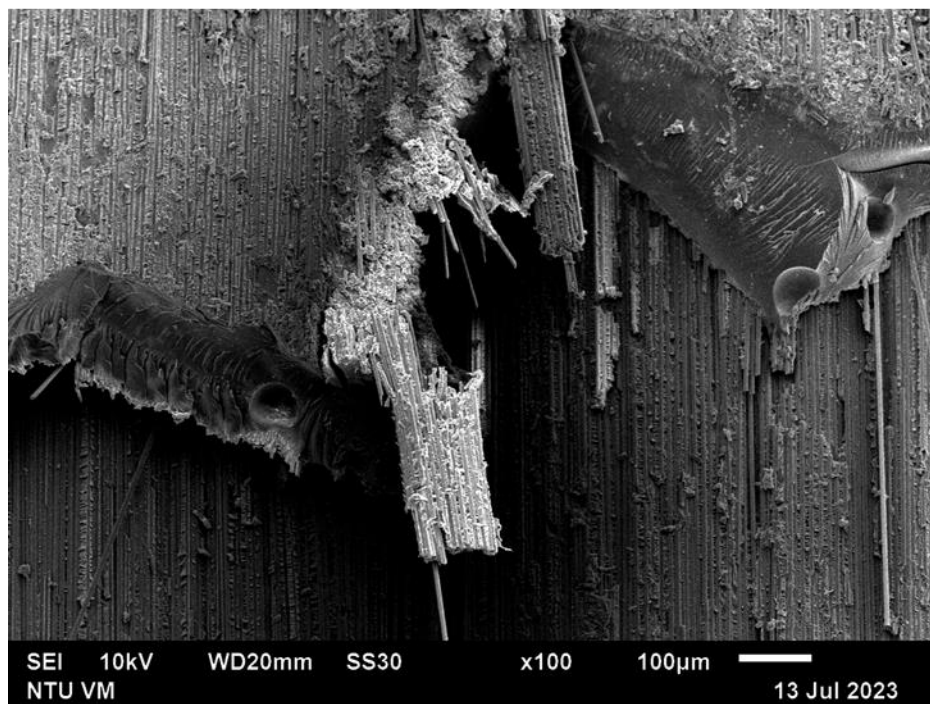


圖 5.17 高溫高濕長天期試片破斷面觀察

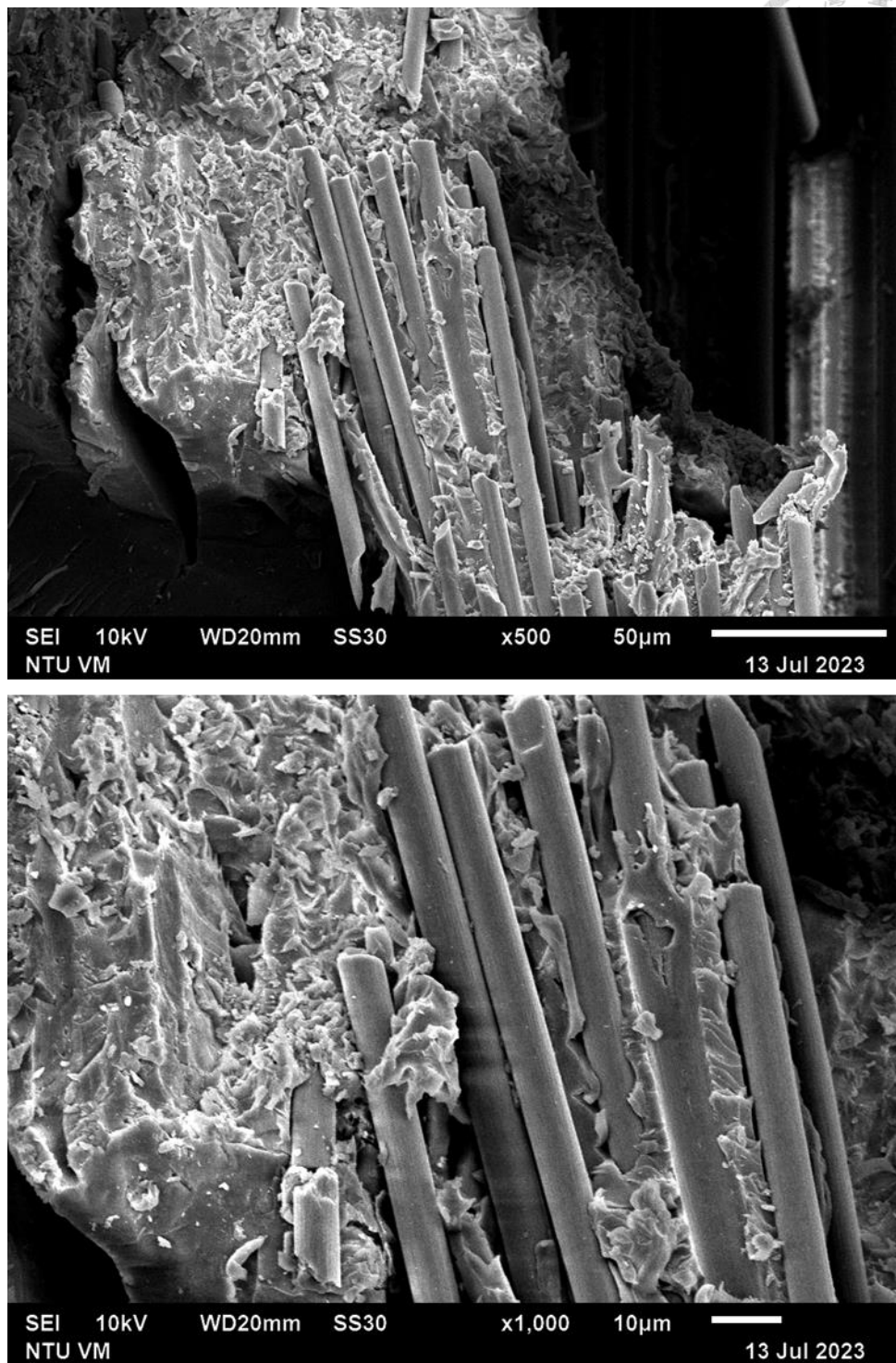


圖 5.18 高溫高濕長天期試片纖維拔出與樹脂塑化現象

(側視圖)

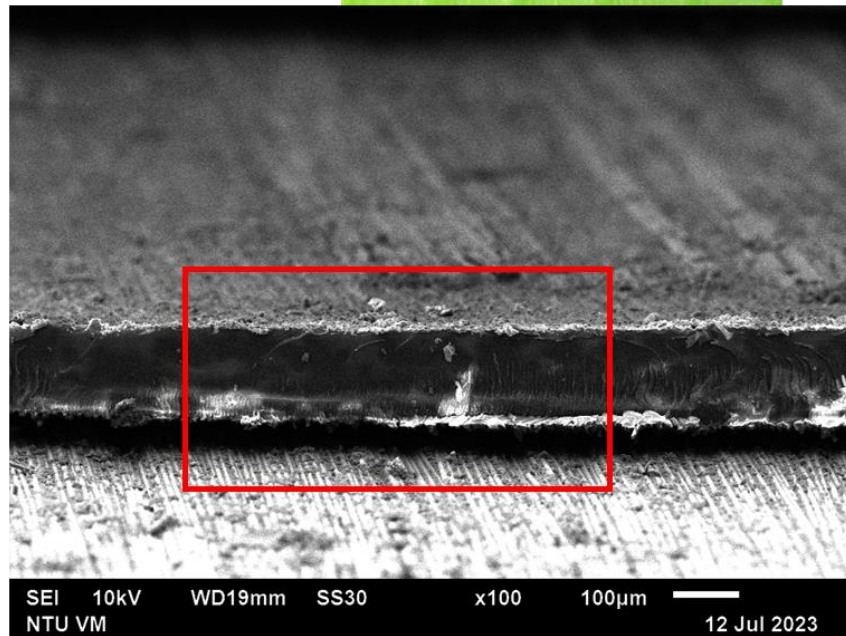
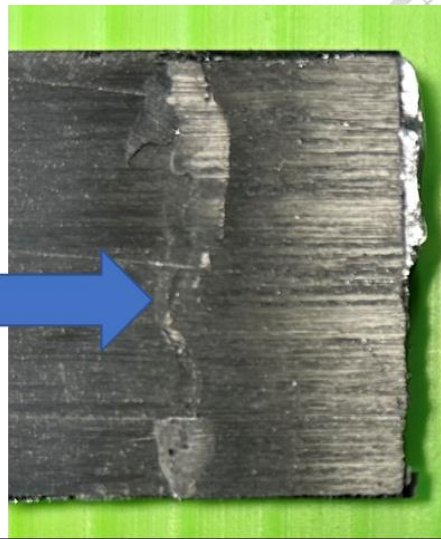


圖 5.19 高溫低濕短天期試片側向觀察破斷面

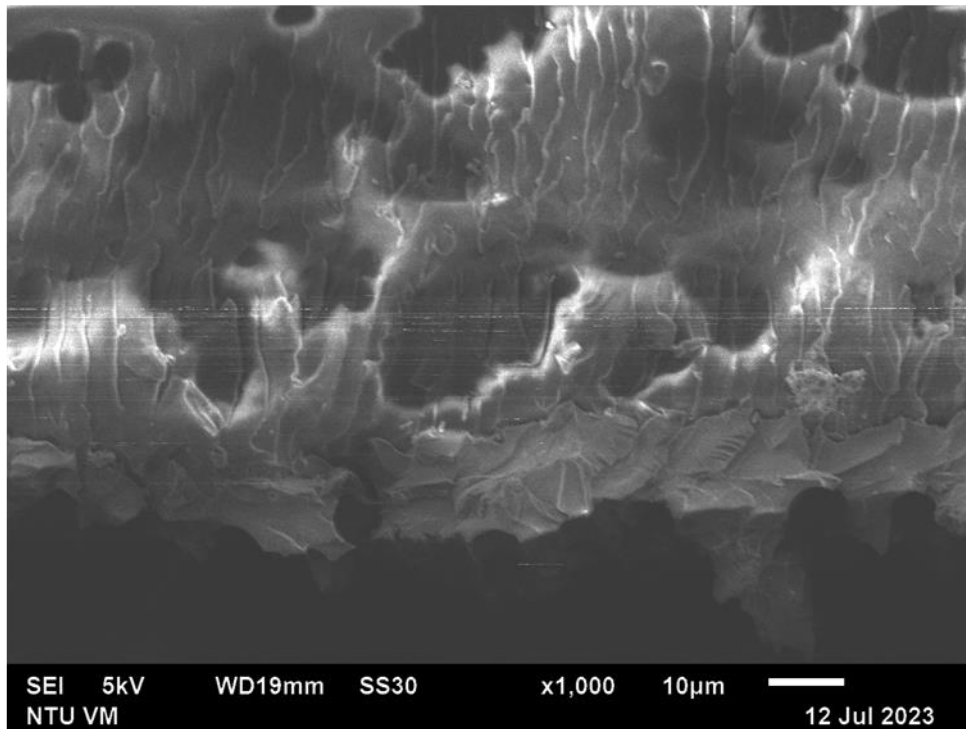
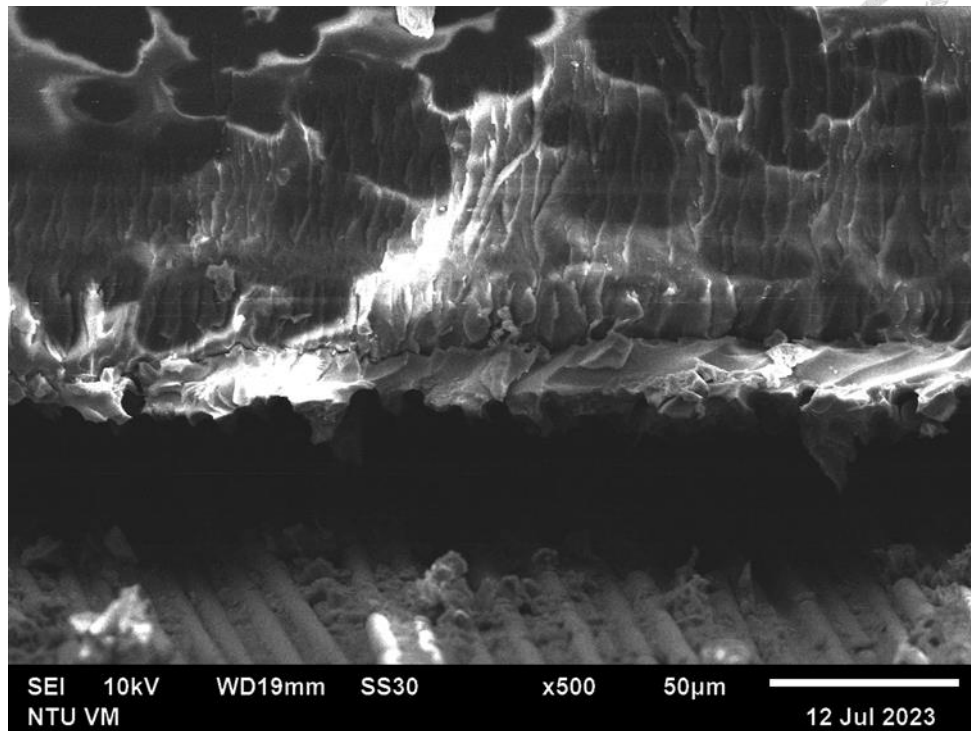


圖 5.20 高溫低濕短天期試片搭接劑與複材纖維介面

(側視圖)

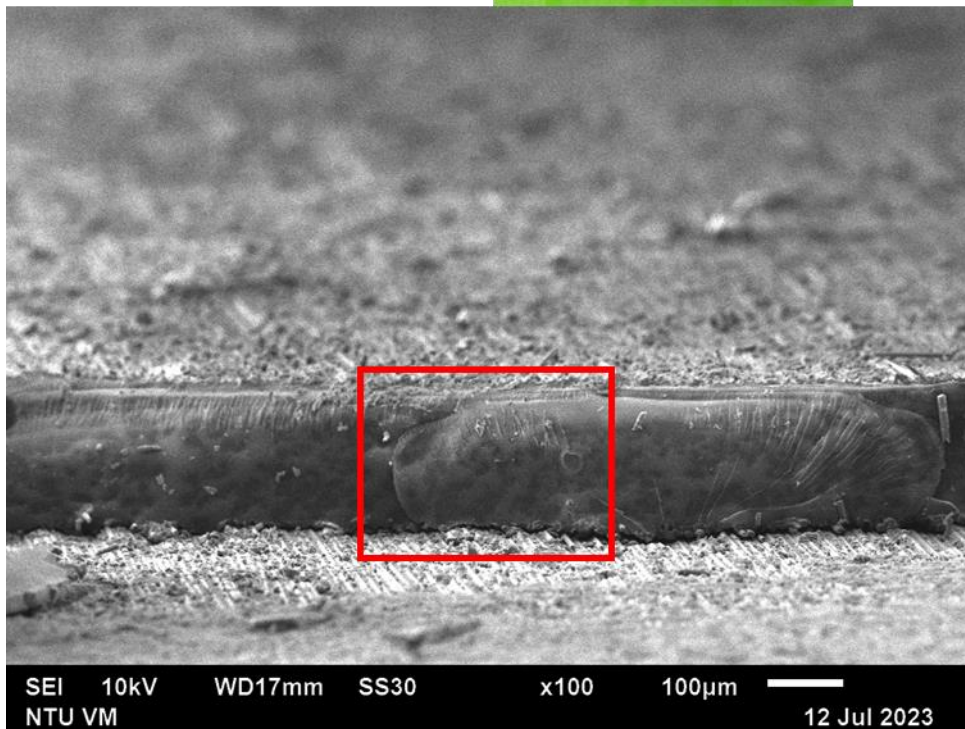
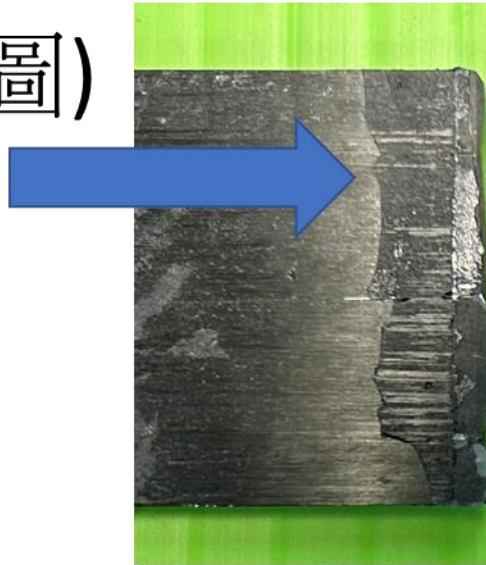


圖 5.21 高溫低濕長天期試片側向觀察破斷面

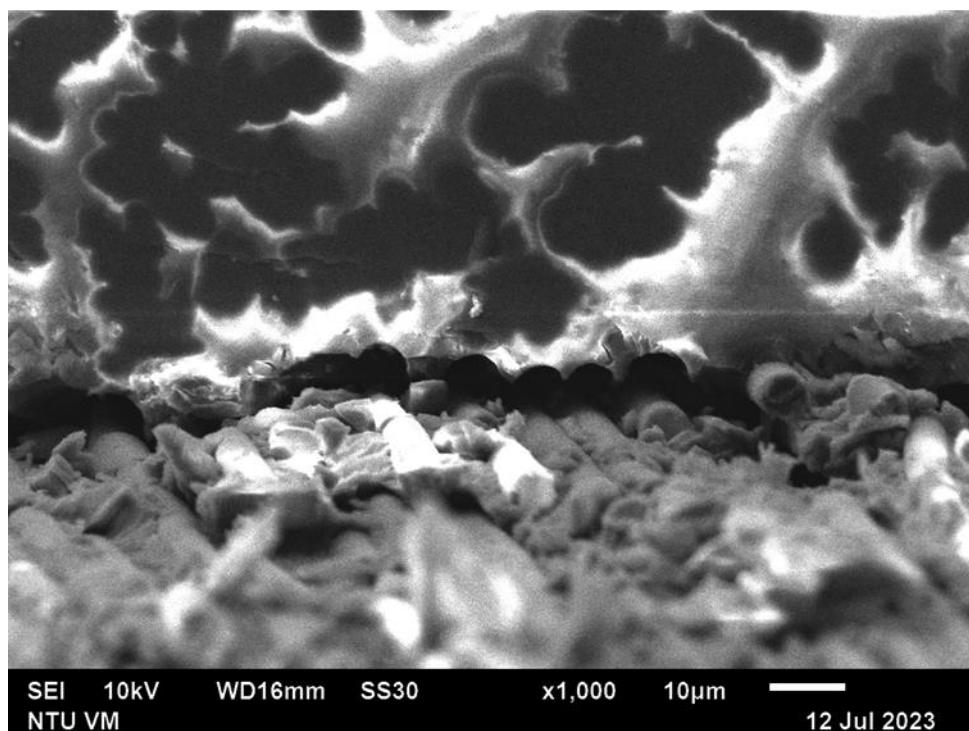
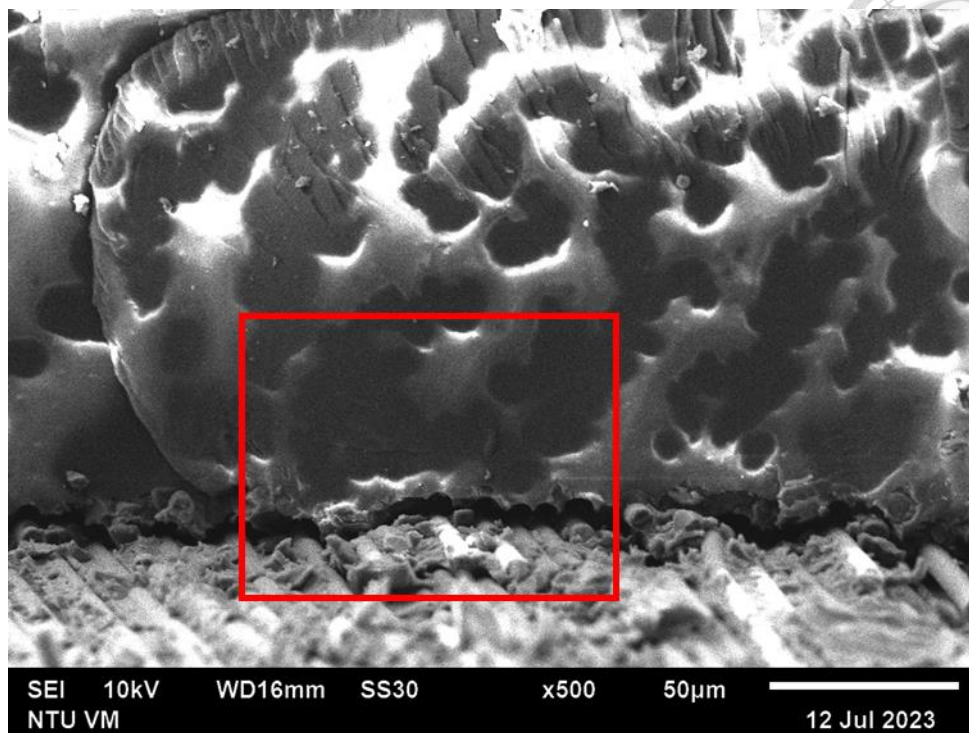


圖 5.22 高溫低濕長天期搭接劑與複材纖維介面

第六章 結論與未來展望



6.1 結論

搭接劑的調配過程中，脫泡的環節影響試片健康程度，尤其是在經過高溫高濕後的試片，脫泡較不完整的試片，經過高溫高濕環境影響後，強度明顯下降，但脫泡較完整試片，強度上無明顯改變；高溫低濕試片則是由強度不變，轉為強度些許上升。

利用電壓變化百分比推算試片電阻變化，在高溫高濕與高溫低濕環境，監控試片破壞情形，目前僅能掌握電壓變化趨勢，原因為在相同實驗參數下的試片，電壓變化百分比的標準差過大。此外，試片原始電阻，與經過老化實驗後的電壓改變量，無法匹配試片強度上升或下降。

利用 SEM 觀察期破壞機制，可以看到高溫高濕試片有纖維拔出(Fiber Pulled-Out)與樹脂塑化現象，而高溫低濕與未經老化試片則無此現象。高溫低濕短天期試片斷裂時，搭接劑上黏附複材本身樹脂，長天期試片則無黏附複材樹脂。

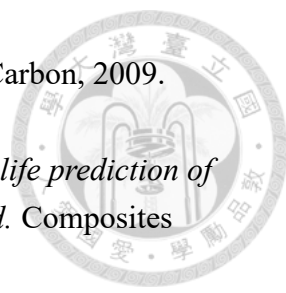
6.2 未來展望

電壓監測溫濕熱環境試片，已掌握其變化趨勢，但仍希望透過其變化量，來預估試片壽命，方能得到最高價值。本實驗著重於試片強度變化與破壞機制，若未來能夠有不同種試驗方法，例如疲勞試驗等，將能補足此方法之重要數據。或是搭配螢光液滲方式，在不同天期下，給予試片一固定負載，觀察其液滲面積，是否能與電性還有疲勞壽命上，找到其關聯性。

參考文獻



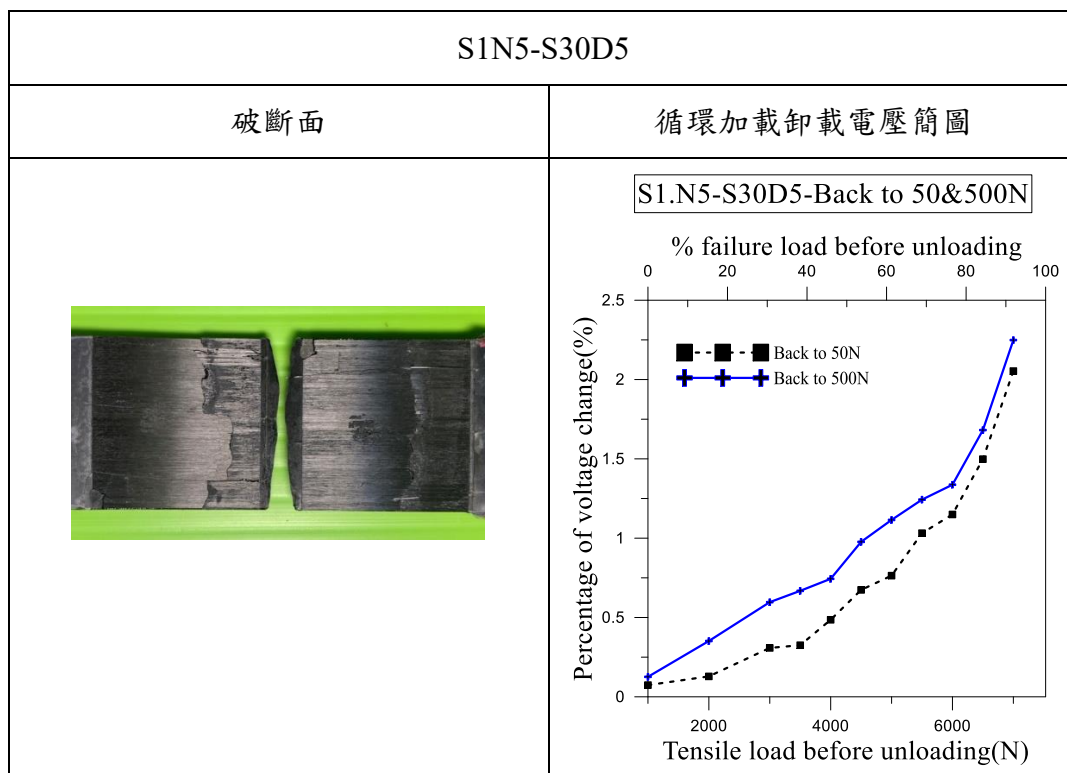
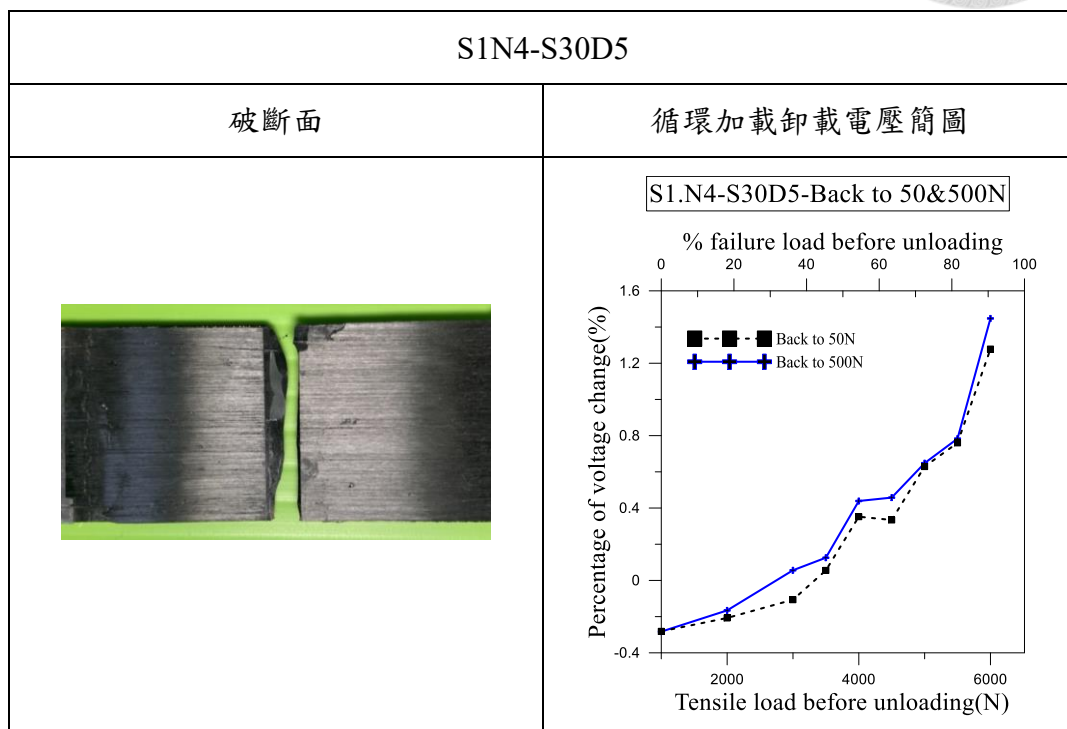
1. Starkova, O., et al., *Water transport in epoxy/MWCNT composites*. European Polymer Journal, 2013. **49**(8): p. 2138-2148.
2. Guo, F.-L., et al., *Multiscale modeling of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced epoxy composites subjected to hygrothermal aging*. Composite Structures, 2021. **256**: p. 113098.
3. Ooijevaar, T.H., et al., *Vibration based Structural Health Monitoring of a composite T-beam*. Composite Structures, 2010. **92**(9): p. 2007-2015.
4. Montalvão, D., A.M.R. Ribeiro, and J. Duarte-Silva, *A method for the localization of damage in a CFRP plate using damping*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009. **23**(6): p. 1846-1854.
5. Gunnion, A.J. and I. Herszberg, *Parametric study of scarf joints in composite structures*. Composite Structures, 2006. **75**(1): p. 364-376.
6. Kahraman, R., M. Sunar, and B. Yilbas, *Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **205**(1): p. 183-189.
7. Banea, M.D. and L.F.M. da Silva, *Mechanical Characterization of Flexible Adhesives*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(4-5): p. 261-285.
8. Gong, Q.-m., et al., *Thermal properties of aligned carbon nanotube/carbon nanocomposites*. Materials Science and Engineering: A, 2004. **384**(1): p. 209-214.
9. Guo, S., S. Dong, and E. Wang, *Constructing Carbon-Nanotube/Metal Hybrid Nanostructures Using Homogeneous TiO₂ as a Spacer*. Small, 2008. **4**(8): p. 1133-1138.
10. Jin, F.-L., X. Li, and S.-J. Park, *Synthesis and application of epoxy resins: A review*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. **29**: p. 1-11.
11. Choi, I., et al., *Radar absorbing sandwich construction composed of CNT, PMI foam and carbon/epoxy composite*. Composite Structures, 2012. **94**(9): p. 3002-3008.
12. Poornima, Rashmi, and J. Sundara Rajan, *Effective use of nano-carbons in controlling the electrical conductivity of epoxy composites*. Composites Science and Technology, 2021. **202**: p. 108554.
13. Lim, A.S., et al., *Damage sensing of adhesively-bonded hybrid composite/steel joints using carbon nanotubes*. Composites Science and Technology, 2011. **71**(9): p. 1183-1189.
14. Gao, L., et al., *Coupled carbon nanotube network and acoustic emission*

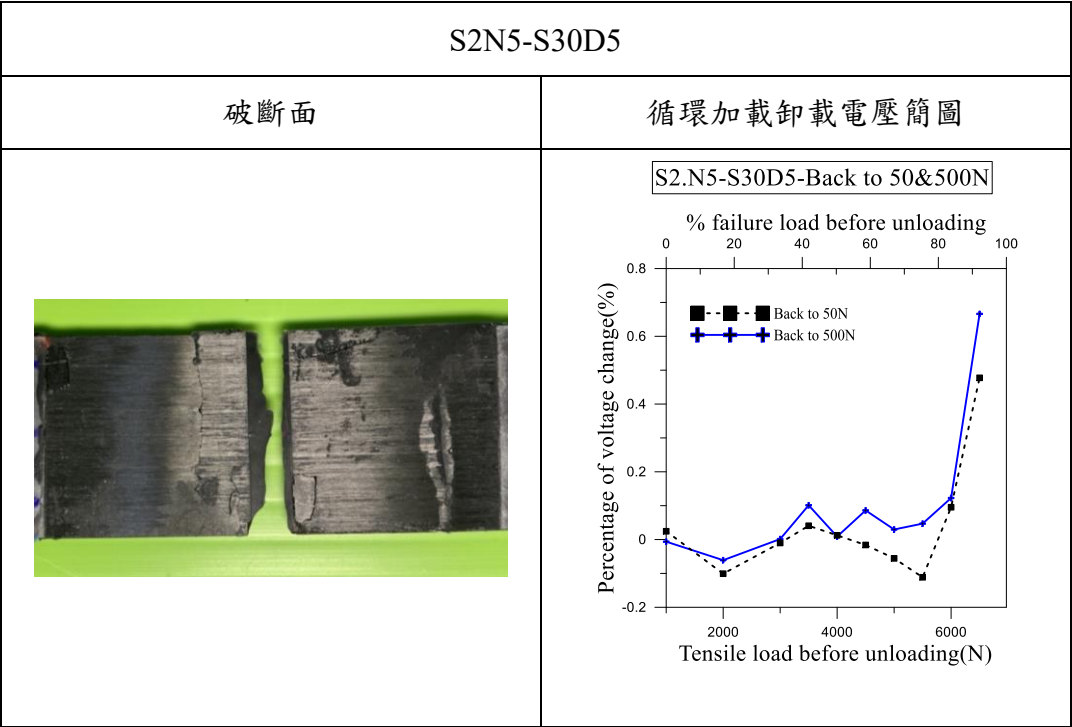
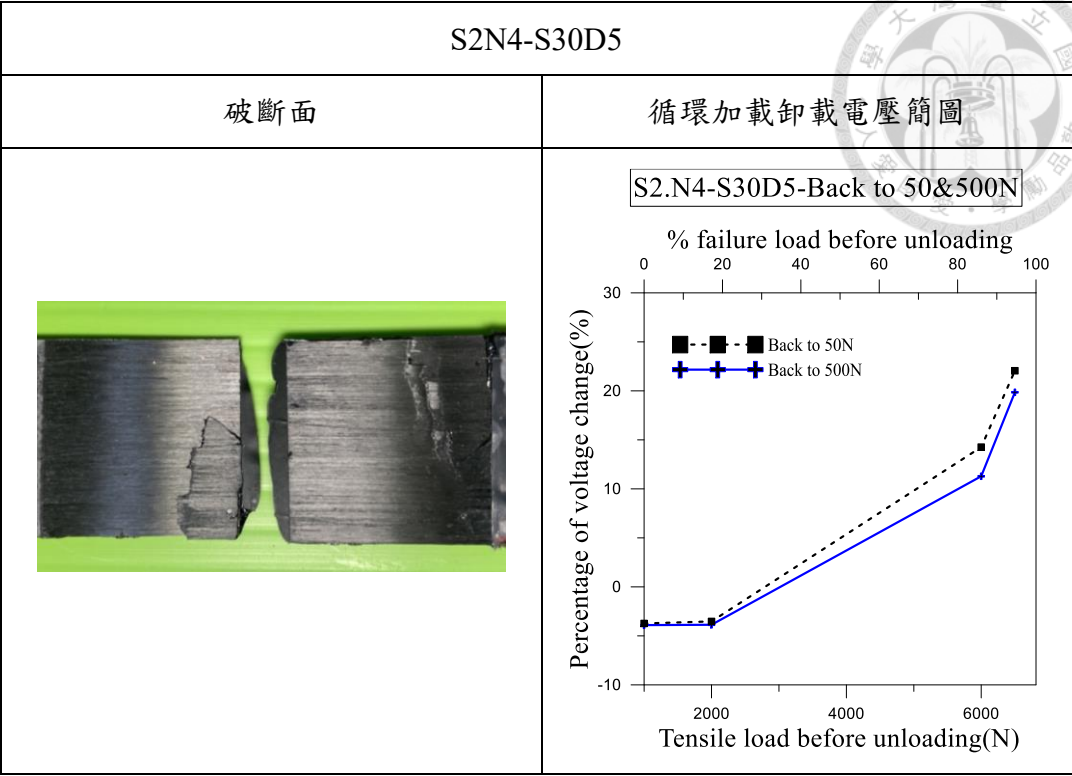
- 
- monitoring for sensing of damage development in composites. Carbon*, 2009. **47**(5): p. 1381-1388.
15. Vavouliotis, A., A. Paipetis, and V. Kostopoulos, *On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method. Composites Science and Technology*, 2011. **71**(5): p. 630-642.
 16. Wang, Y. and T.H. Hahn, *AFM characterization of the interfacial properties of carbon fiber reinforced polymer composites subjected to hygrothermal treatments. Composites Science and Technology*, 2007. **67**(1): p. 92-101.
 17. Niu, Y.-F., Y. Yan, and J.-W. Yao, *Hygrothermal aging mechanism of carbon fiber/epoxy resin composites based on quantitative characterization of interface structure. Polymer Testing*, 2021. **94**: p. 107019.
 18. Jojibabu, P., et al., *Effect of carbon nano-filler addition on the degradation of epoxy adhesive joints subjected to hygrothermal aging. Polymer Degradation and Stability*, 2017. **140**: p. 84-94.

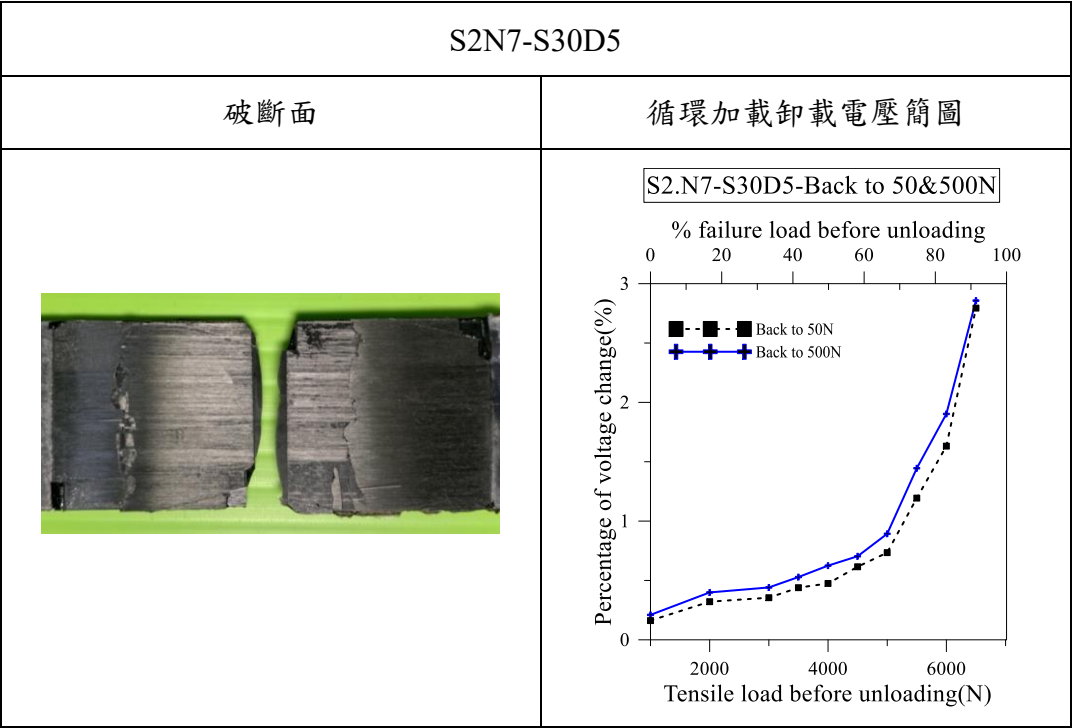
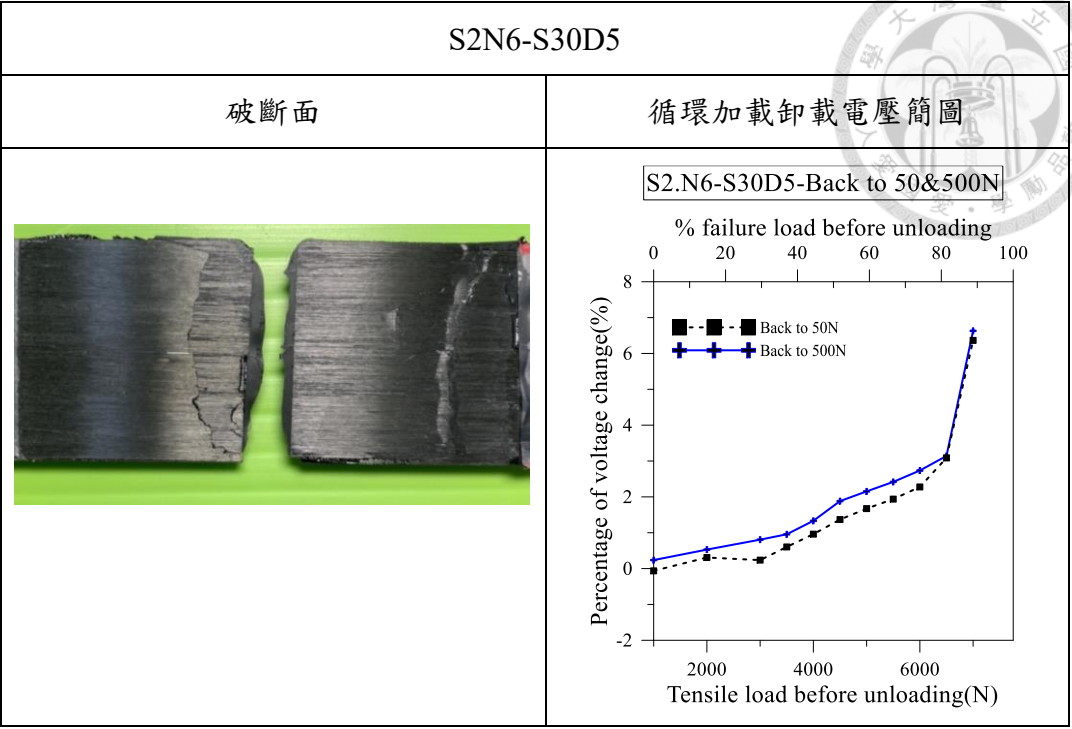
附錄

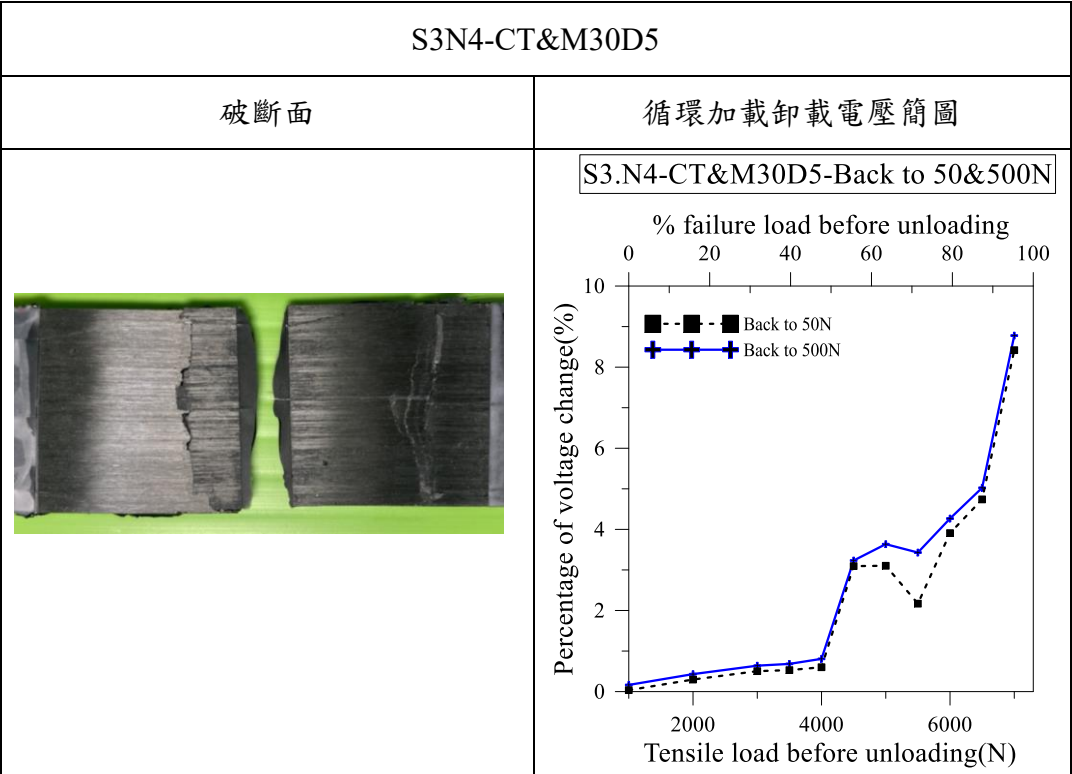
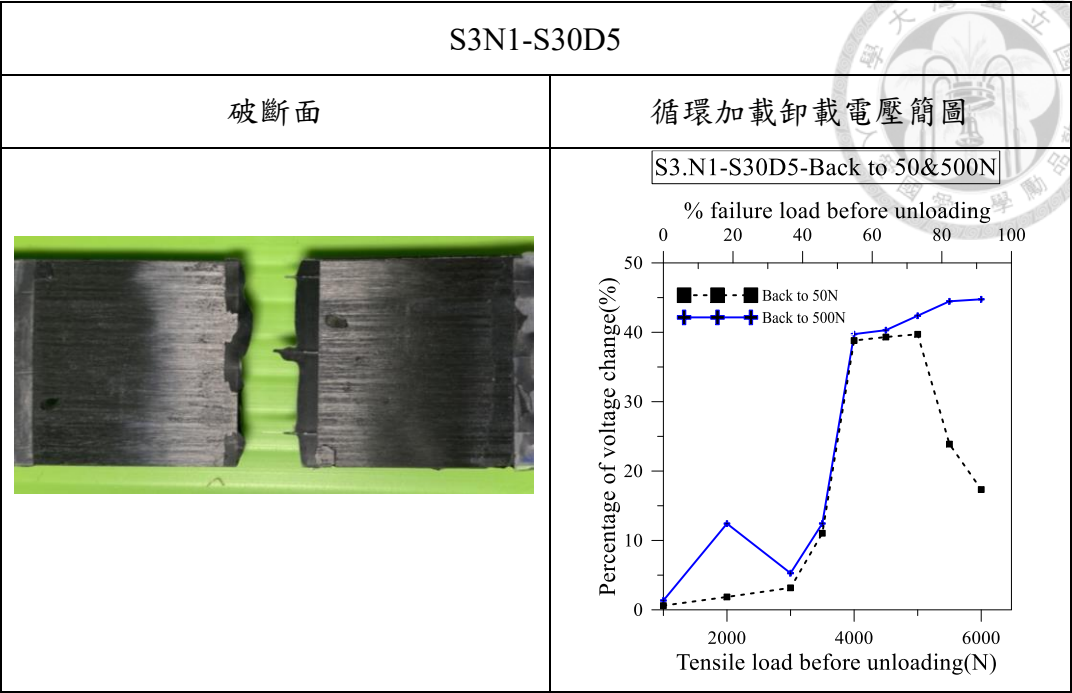


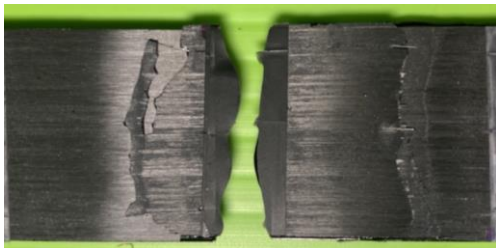
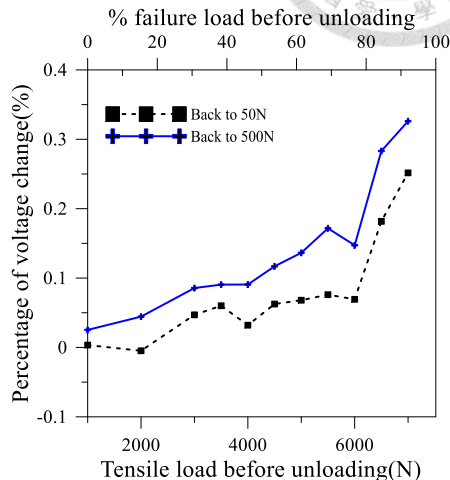
循環加載卸載拉伸試驗

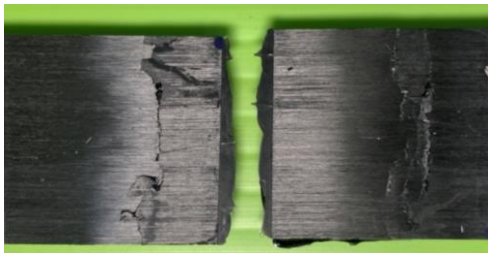


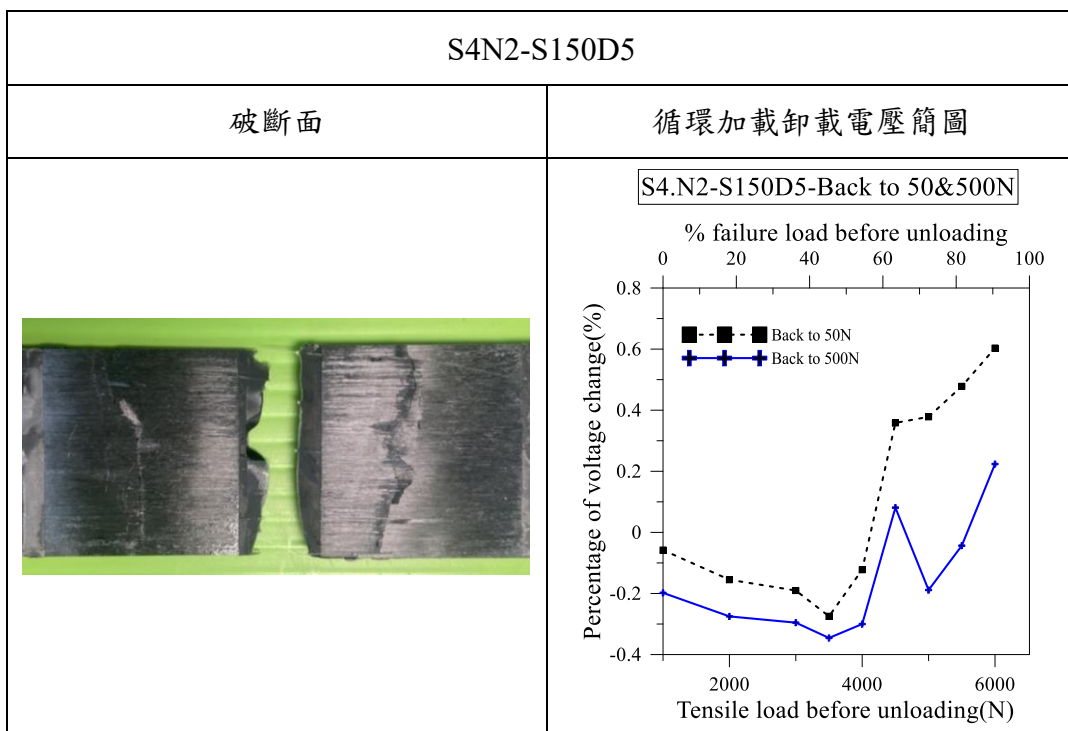
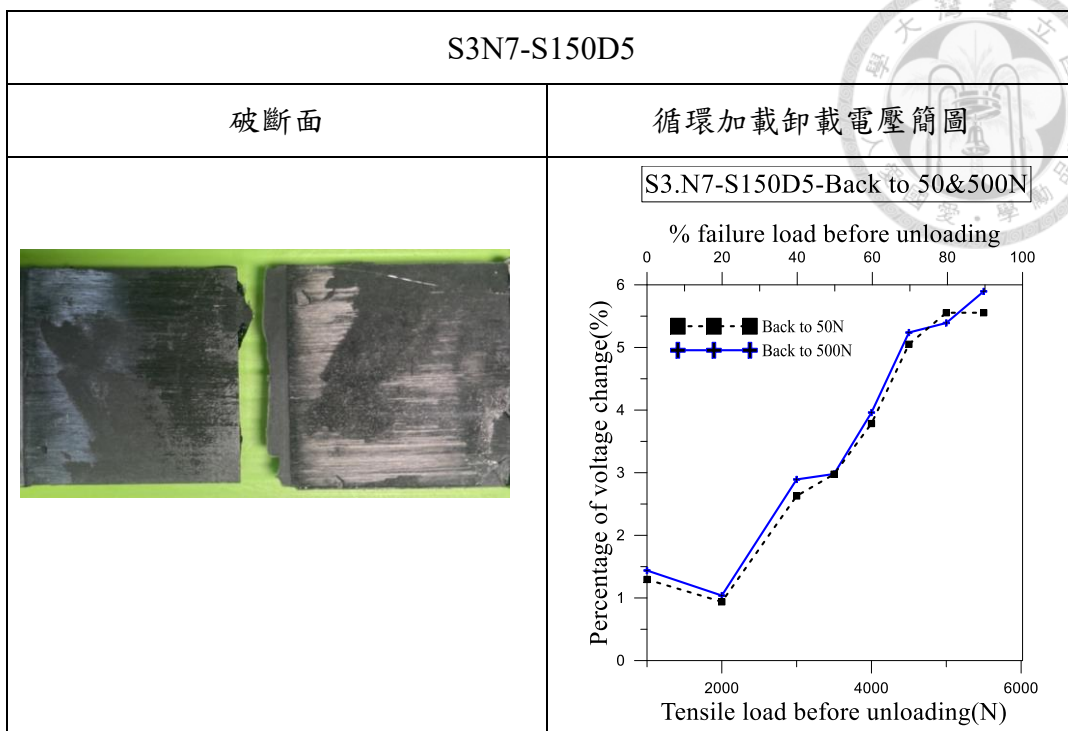


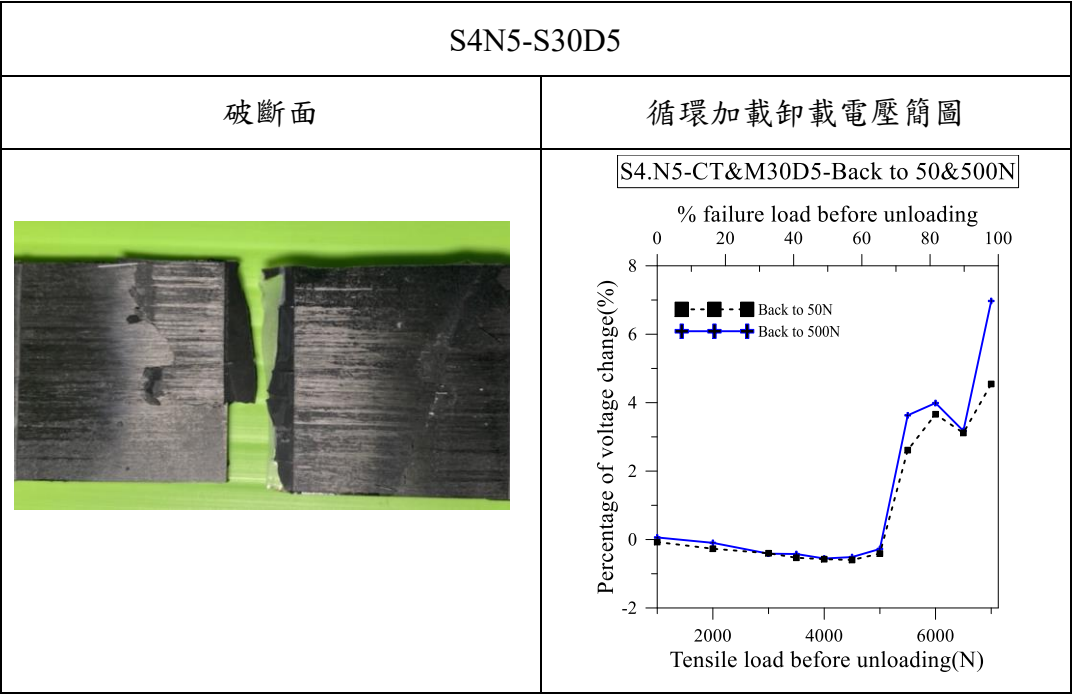
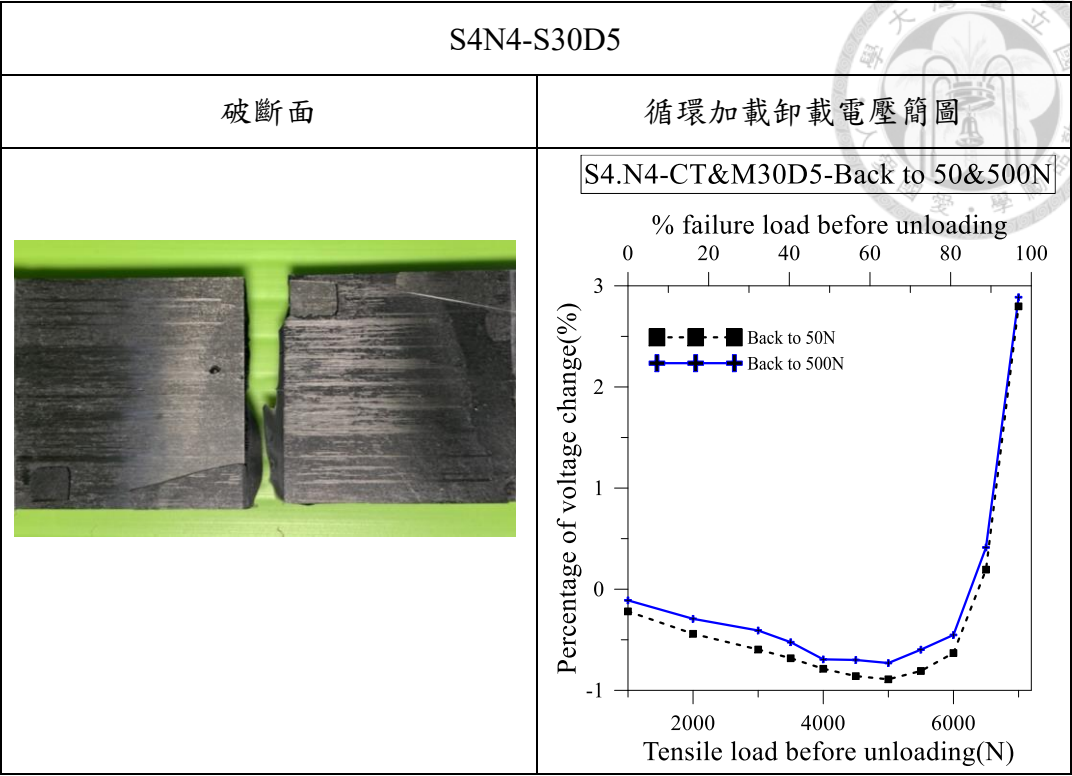


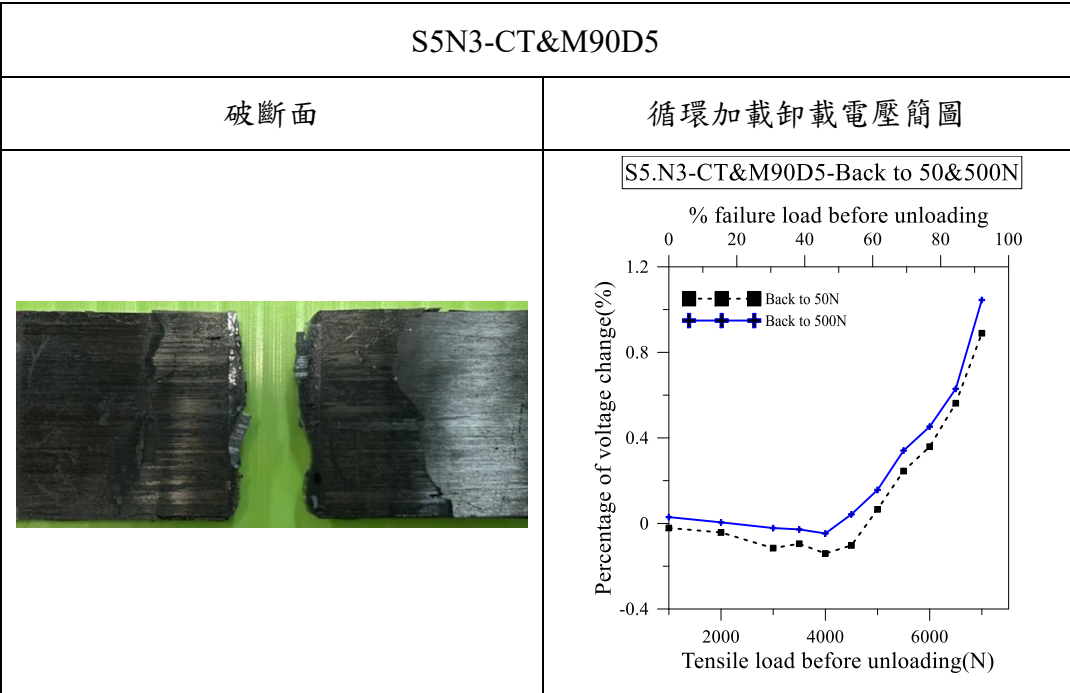
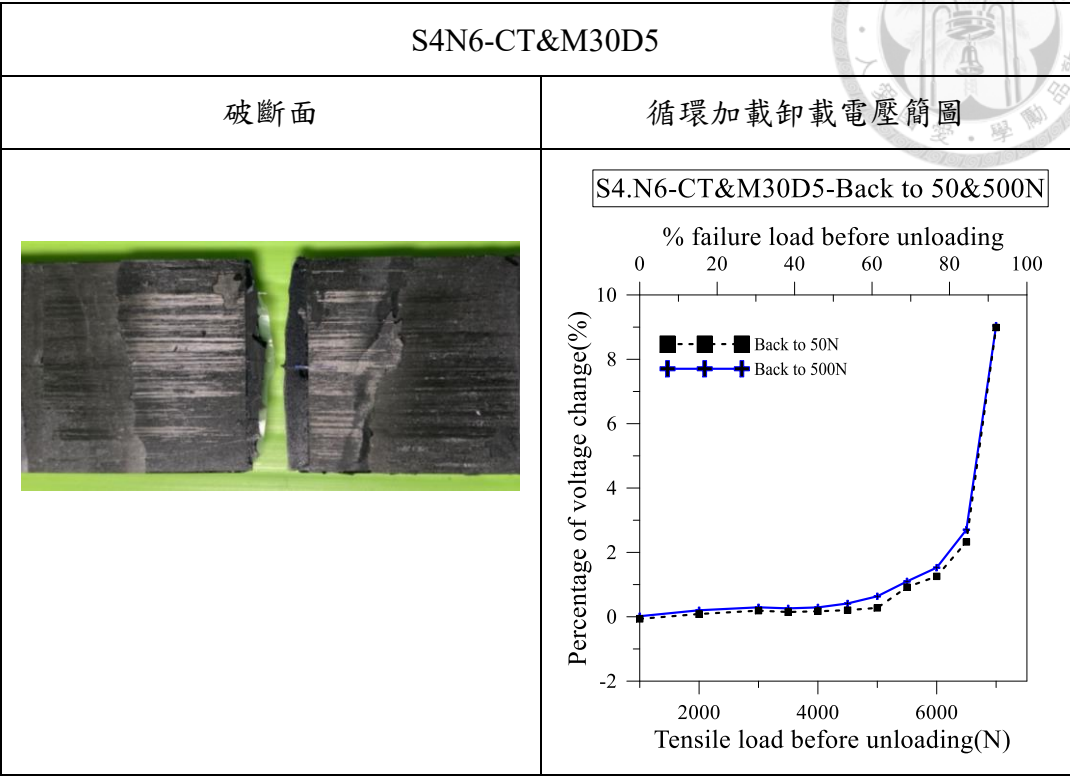


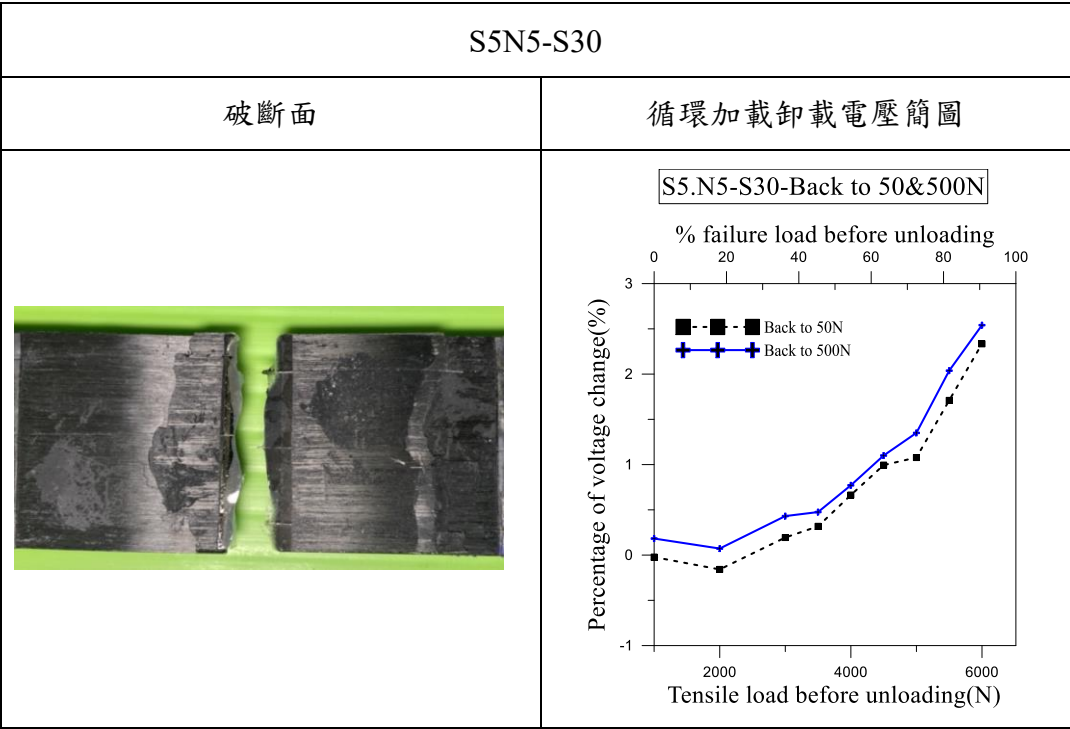
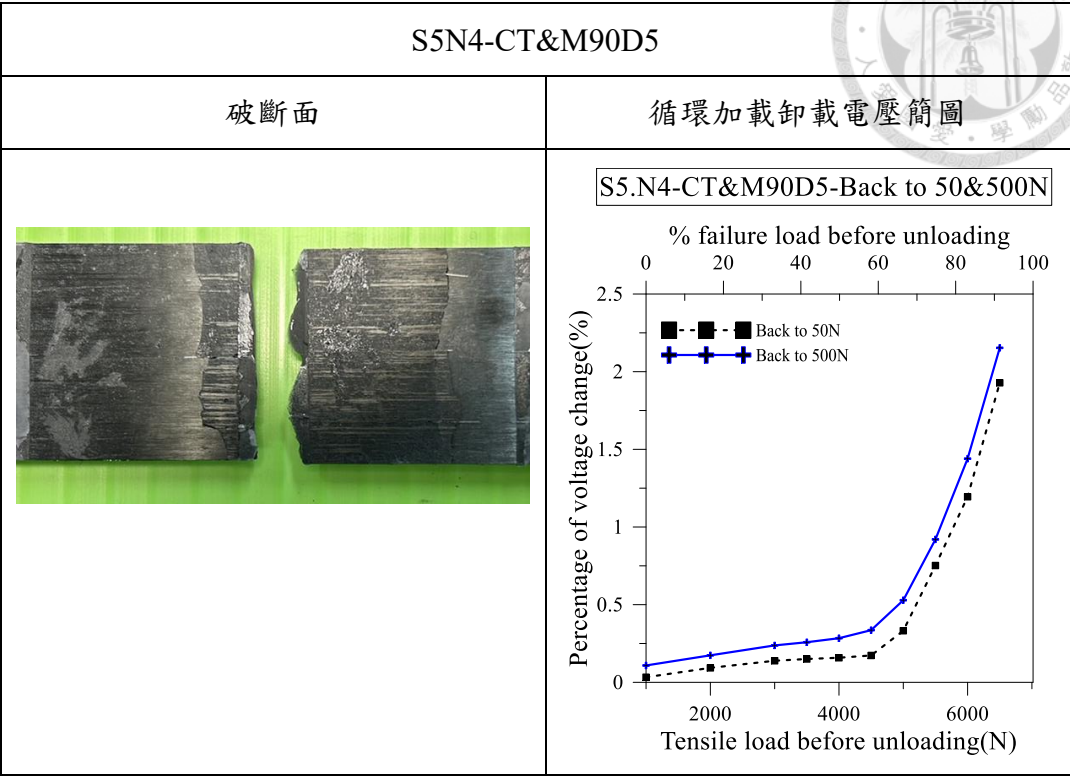
S3N5-CT&M30D5																												
破斷面	循環加載卸載電壓簡圖																											
	S3.N5-CT&M30D5-Back to 50&500N  <table><caption>Estimated data for S3.N5-CT&M30D5-Back to 50&500N</caption><thead><tr><th>Tensile load before unloading (N)</th><th>Percentage of voltage change (%) - Back to 50N</th><th>Percentage of voltage change (%) - Back to 500N</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>2000</td><td>-0.01</td><td>0.04</td></tr><tr><td>3000</td><td>0.05</td><td>0.08</td></tr><tr><td>4000</td><td>0.03</td><td>0.10</td></tr><tr><td>5000</td><td>0.07</td><td>0.14</td></tr><tr><td>6000</td><td>0.07</td><td>0.15</td></tr><tr><td>7000</td><td>0.18</td><td>0.28</td></tr><tr><td>8000</td><td>0.25</td><td>0.33</td></tr></tbody></table>	Tensile load before unloading (N)	Percentage of voltage change (%) - Back to 50N	Percentage of voltage change (%) - Back to 500N	0	0.00	0.00	2000	-0.01	0.04	3000	0.05	0.08	4000	0.03	0.10	5000	0.07	0.14	6000	0.07	0.15	7000	0.18	0.28	8000	0.25	0.33
Tensile load before unloading (N)	Percentage of voltage change (%) - Back to 50N	Percentage of voltage change (%) - Back to 500N																										
0	0.00	0.00																										
2000	-0.01	0.04																										
3000	0.05	0.08																										
4000	0.03	0.10																										
5000	0.07	0.14																										
6000	0.07	0.15																										
7000	0.18	0.28																										
8000	0.25	0.33																										

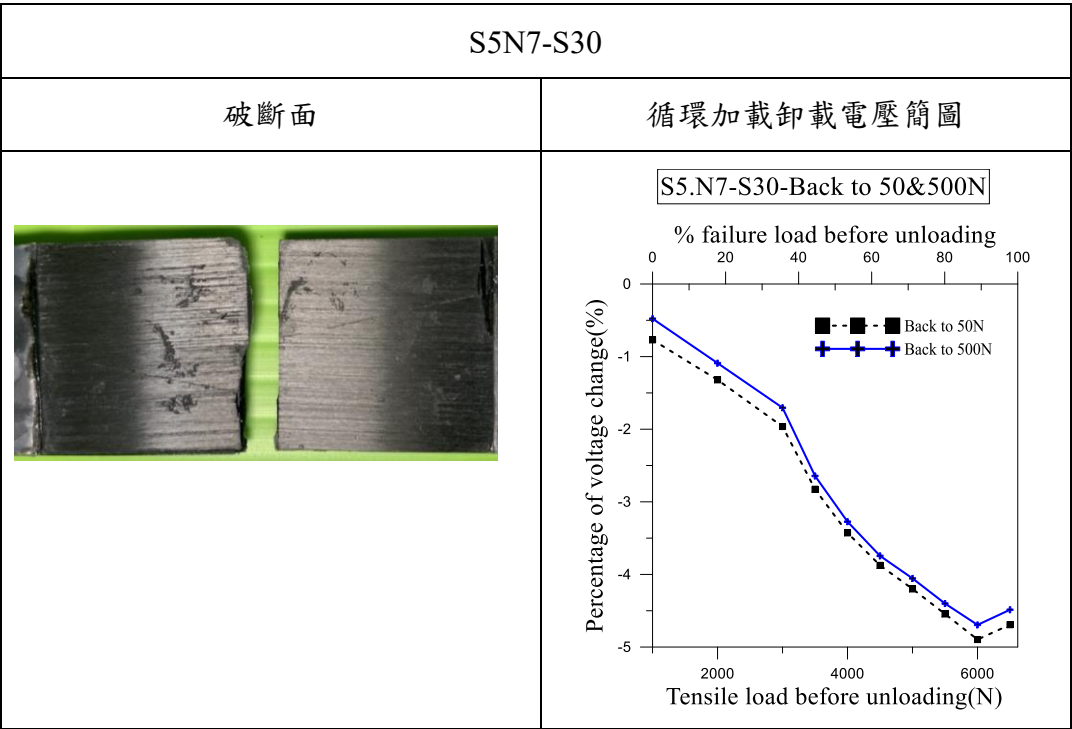
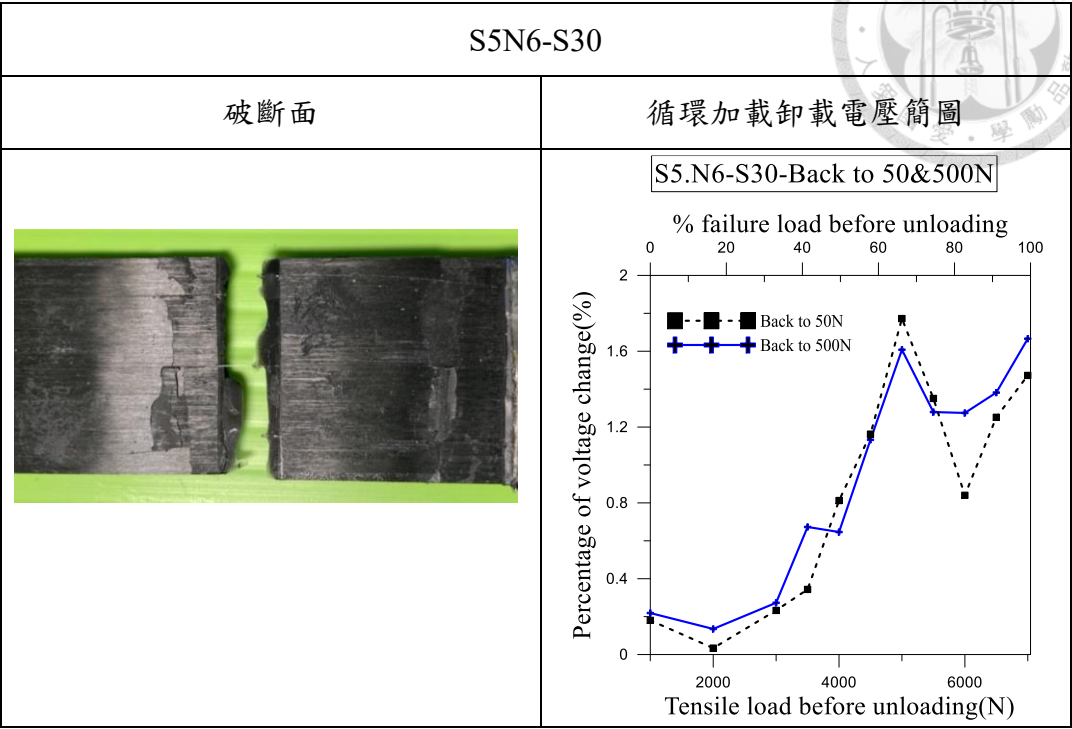
S3N6-S30D5	
破斷面	循環加載卸載電壓簡圖
	(銅箔斷裂)

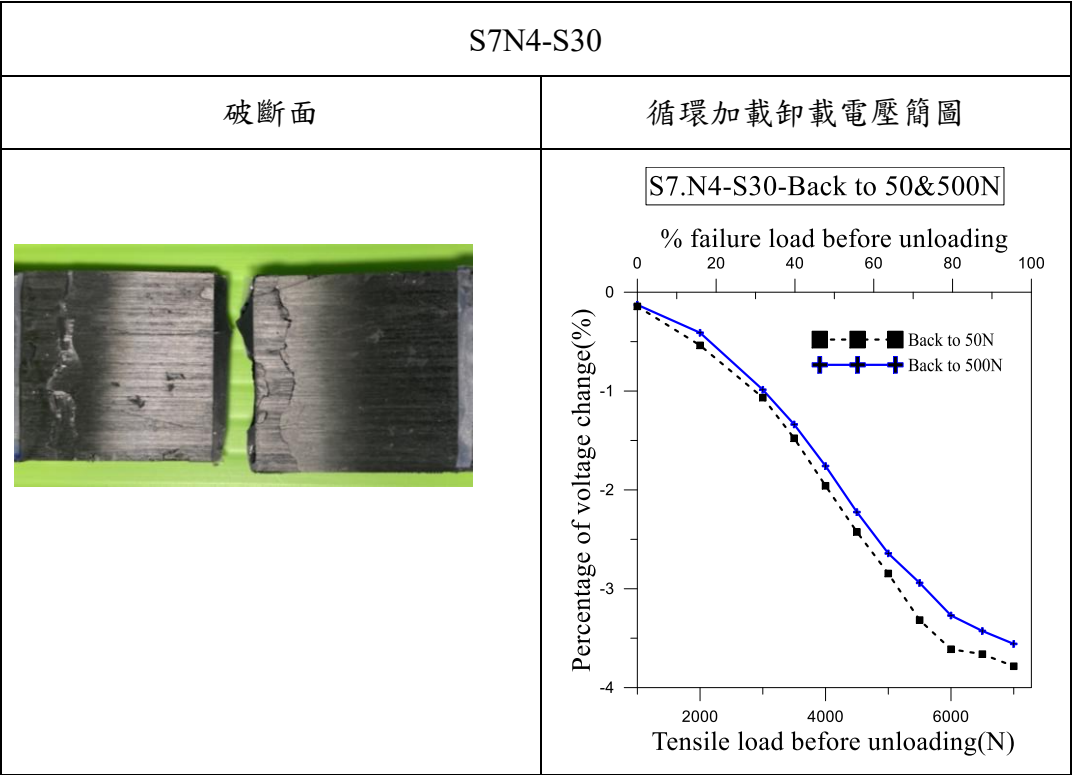
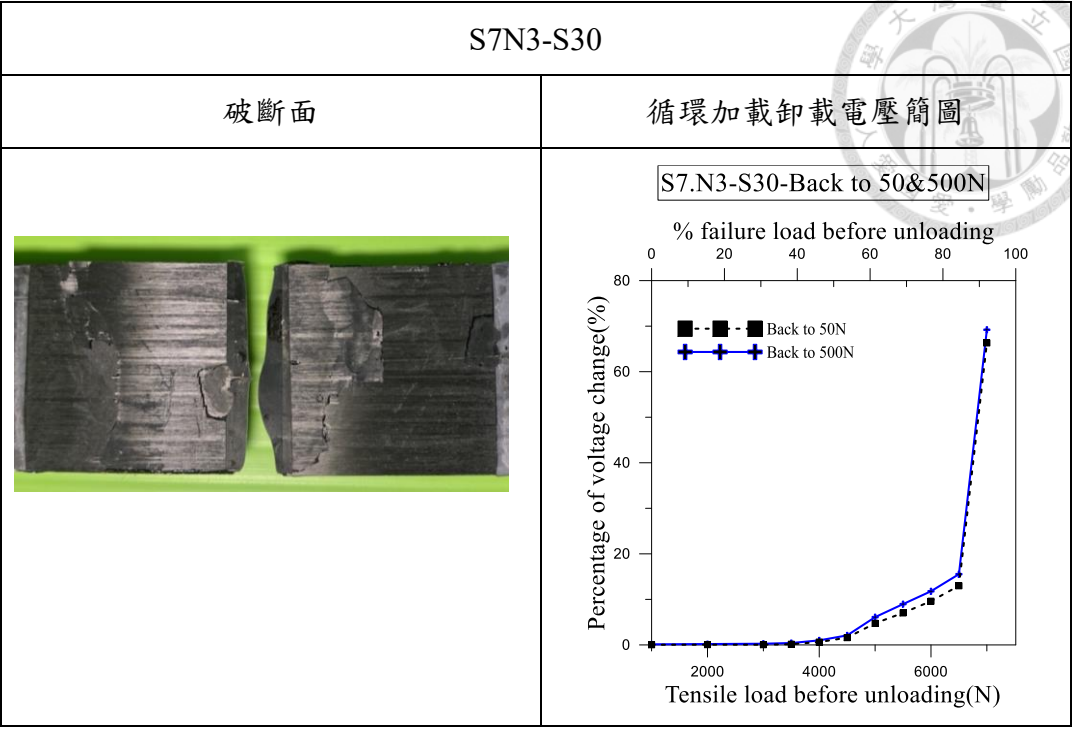


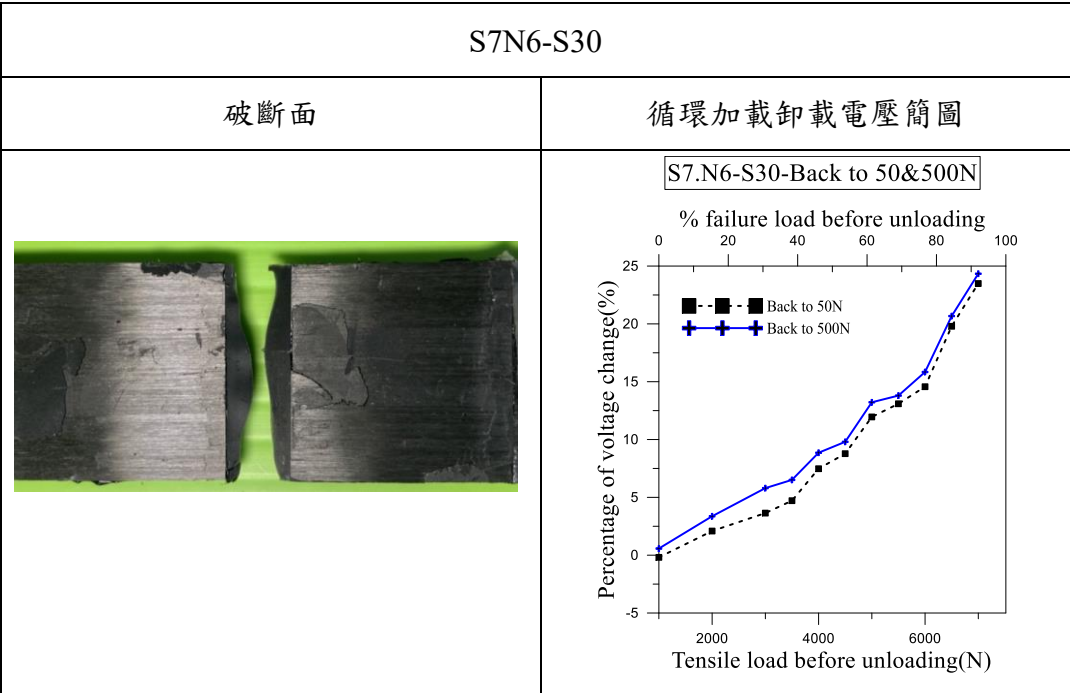
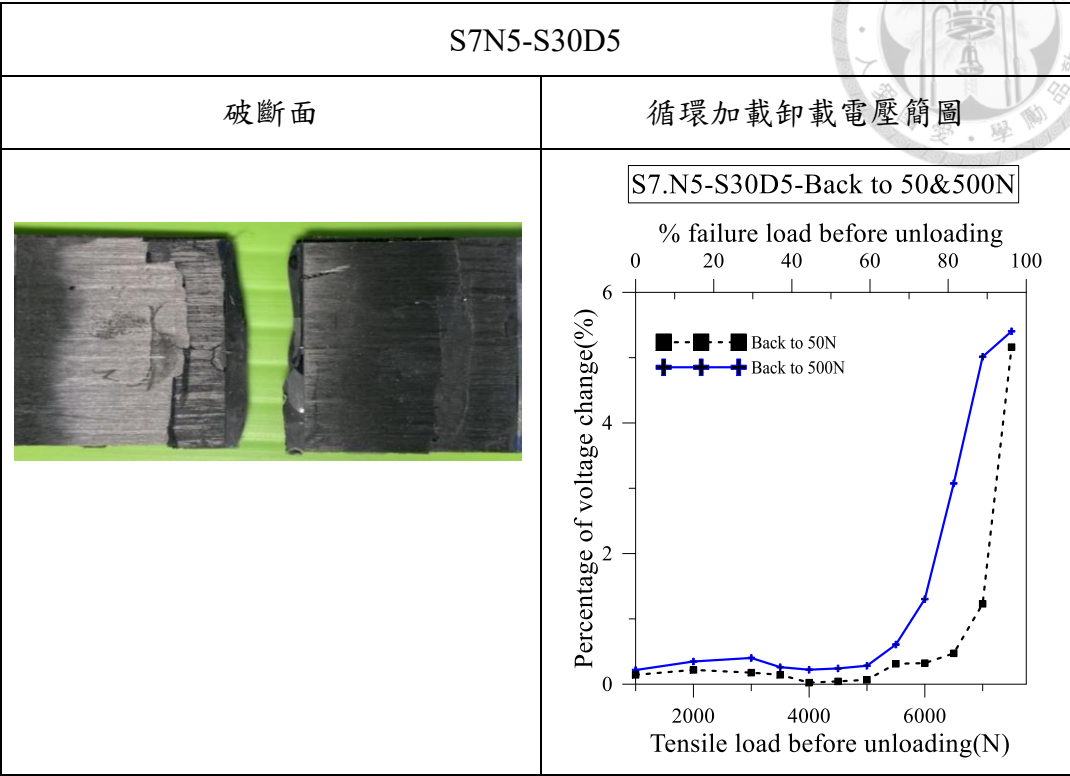


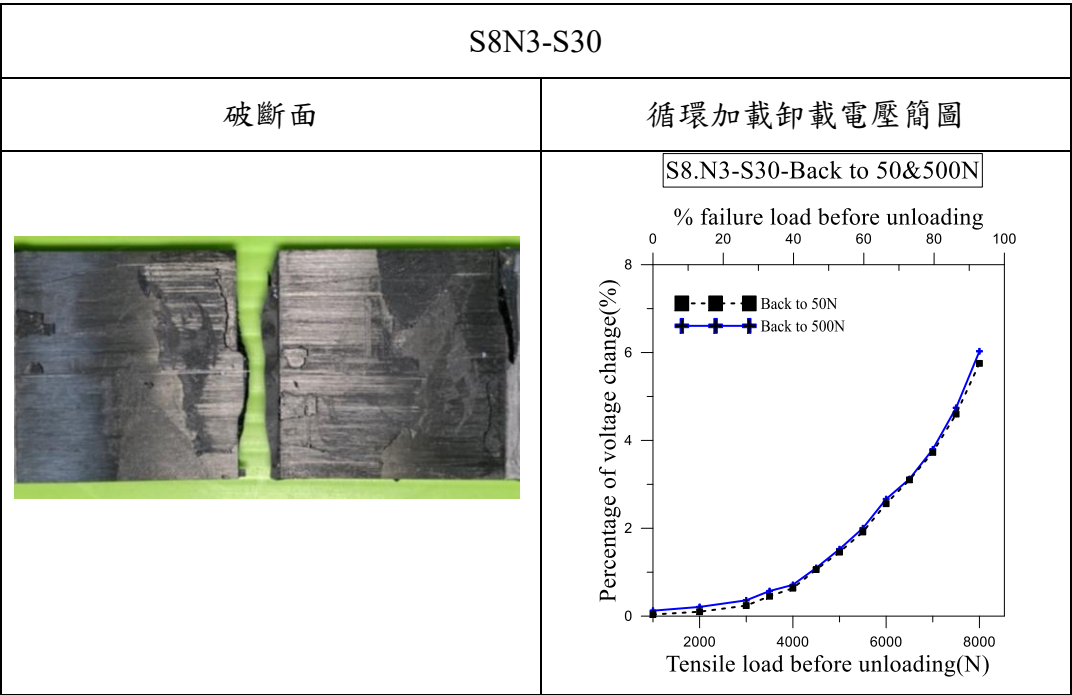
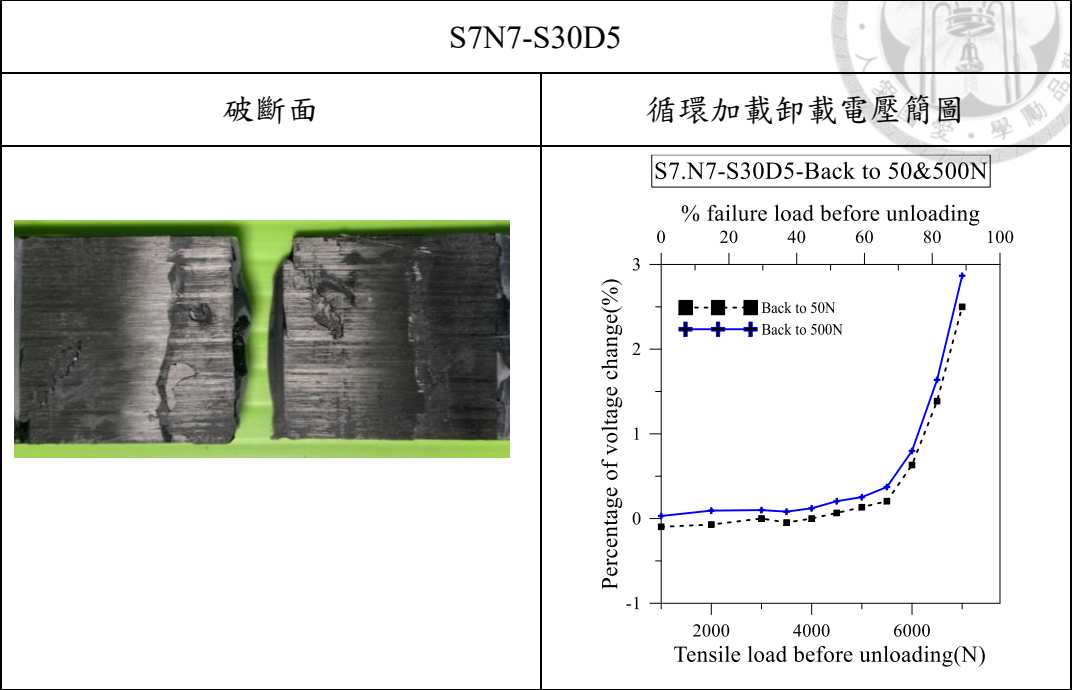


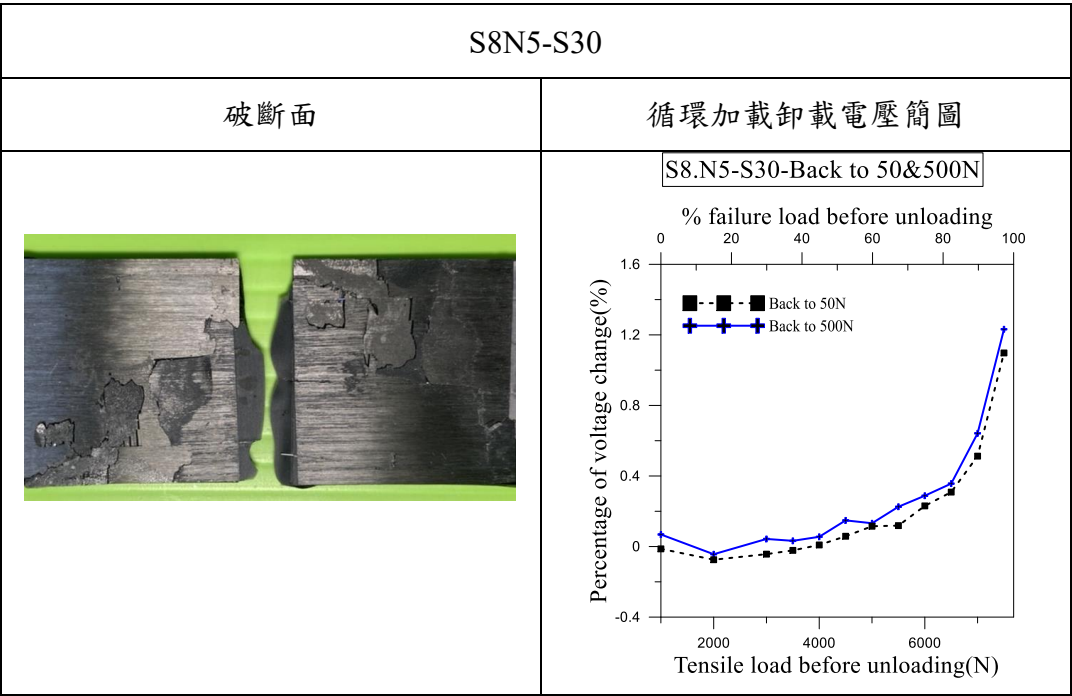
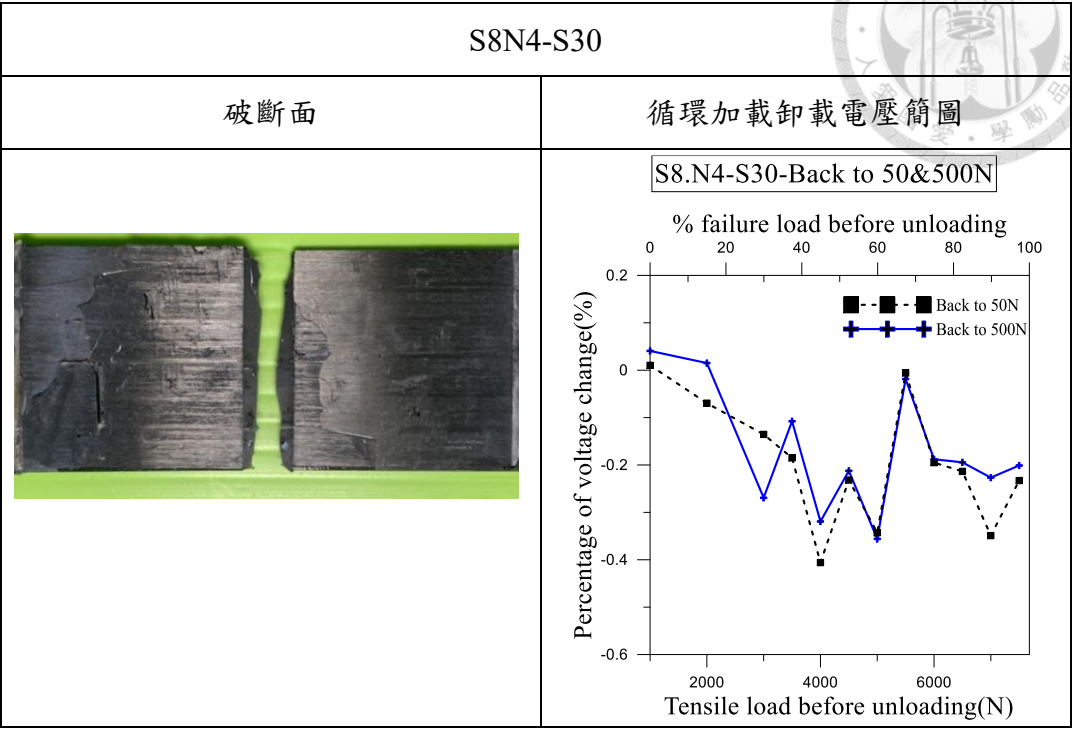


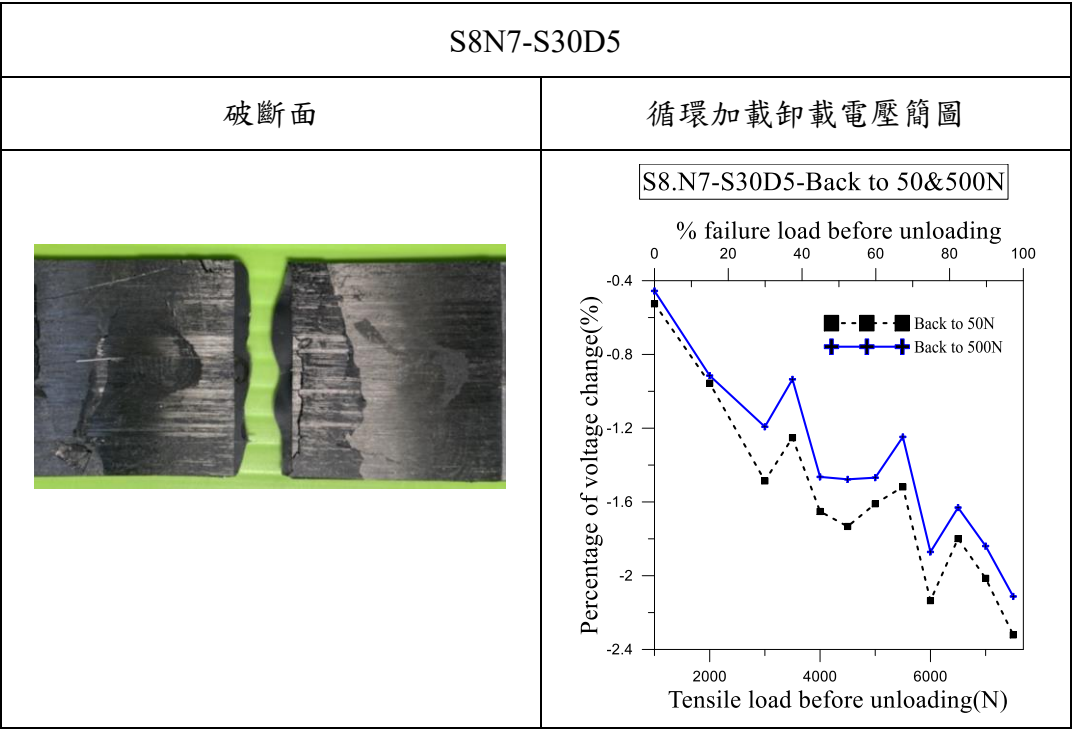
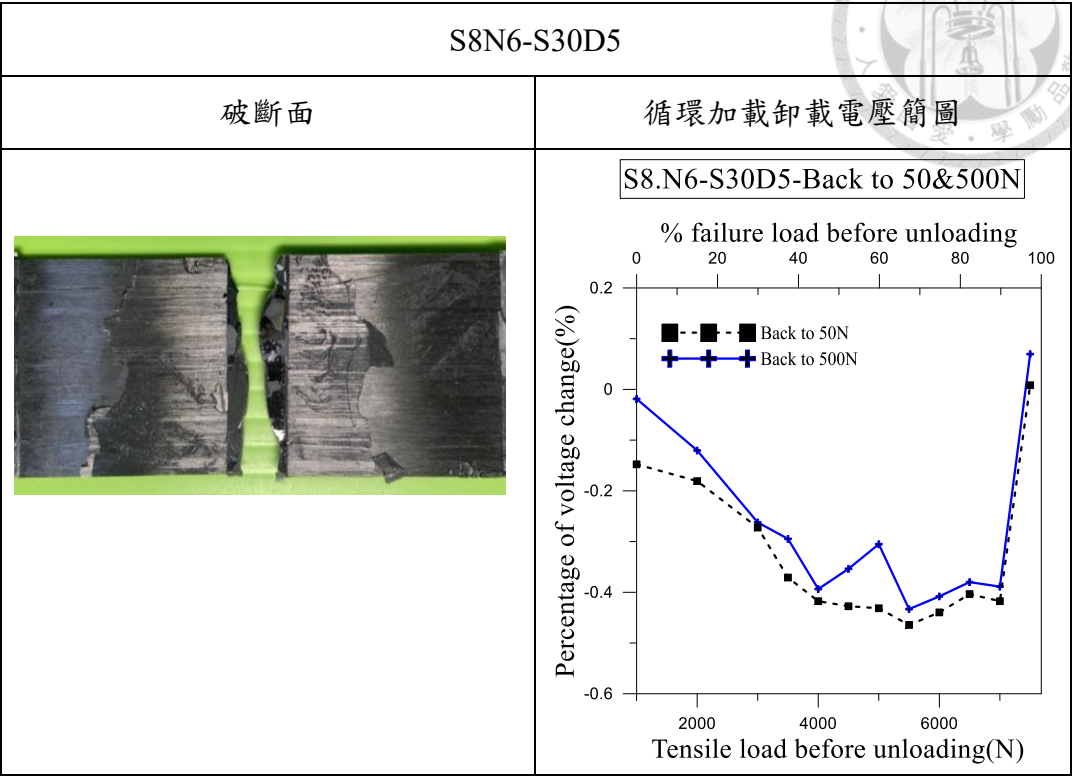


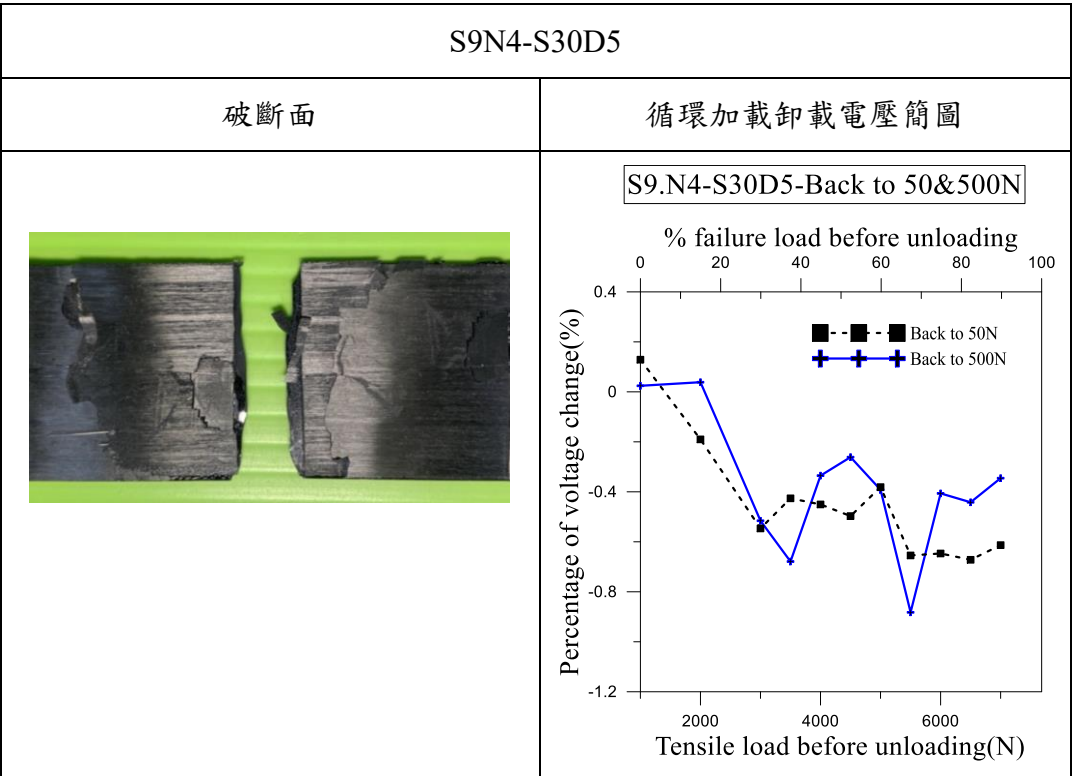
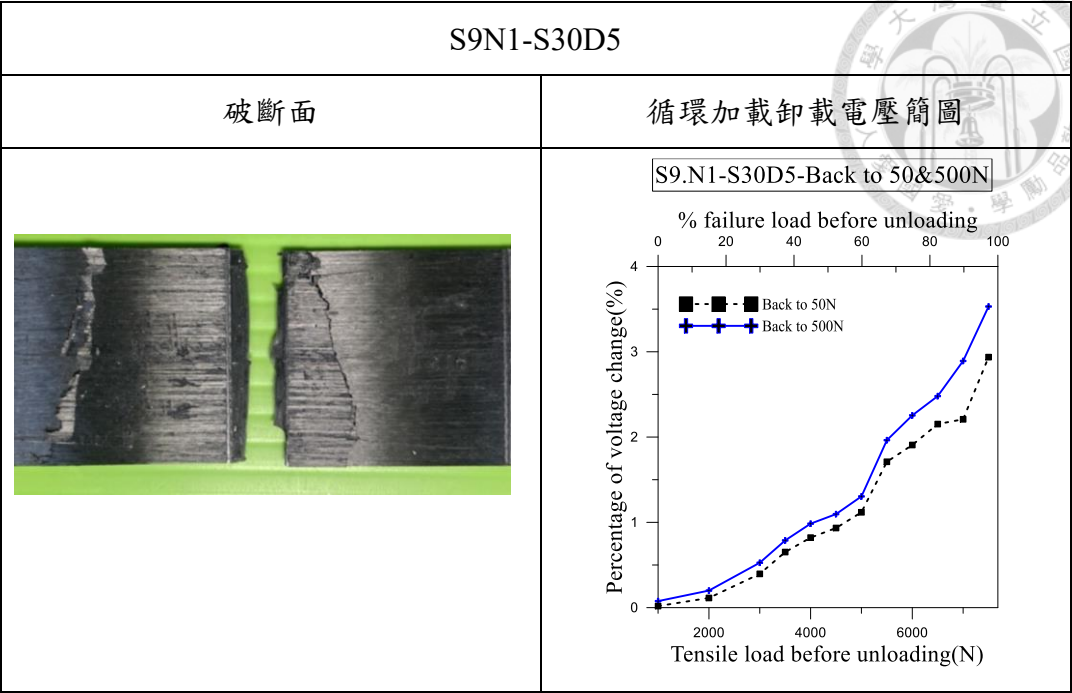


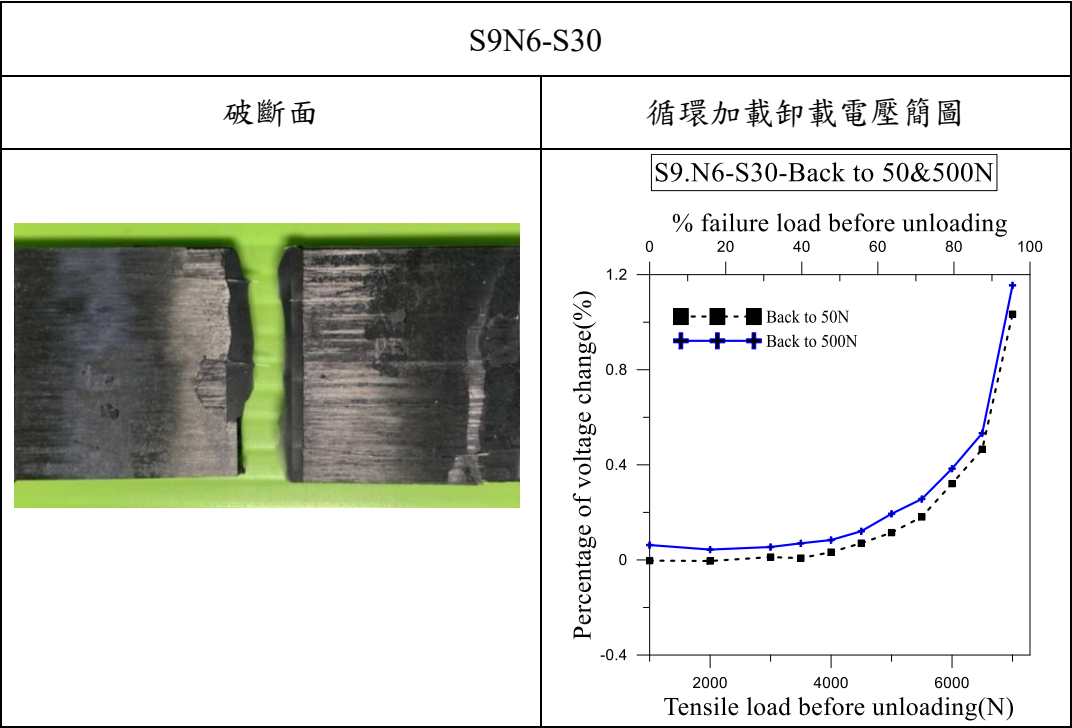
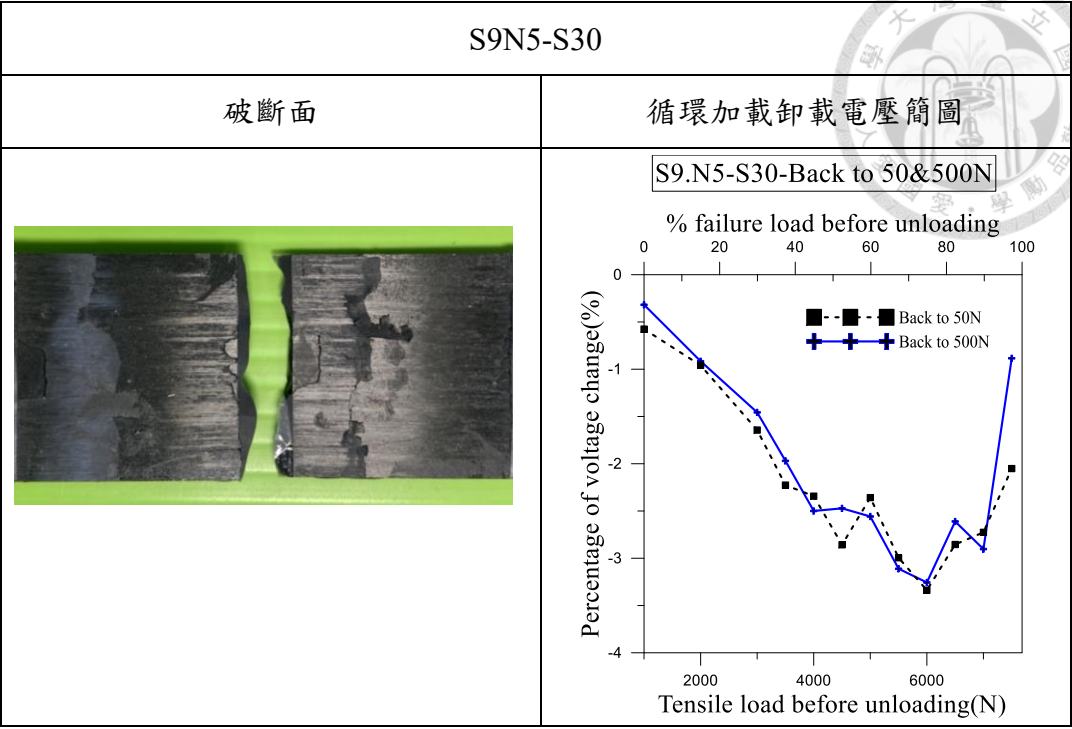


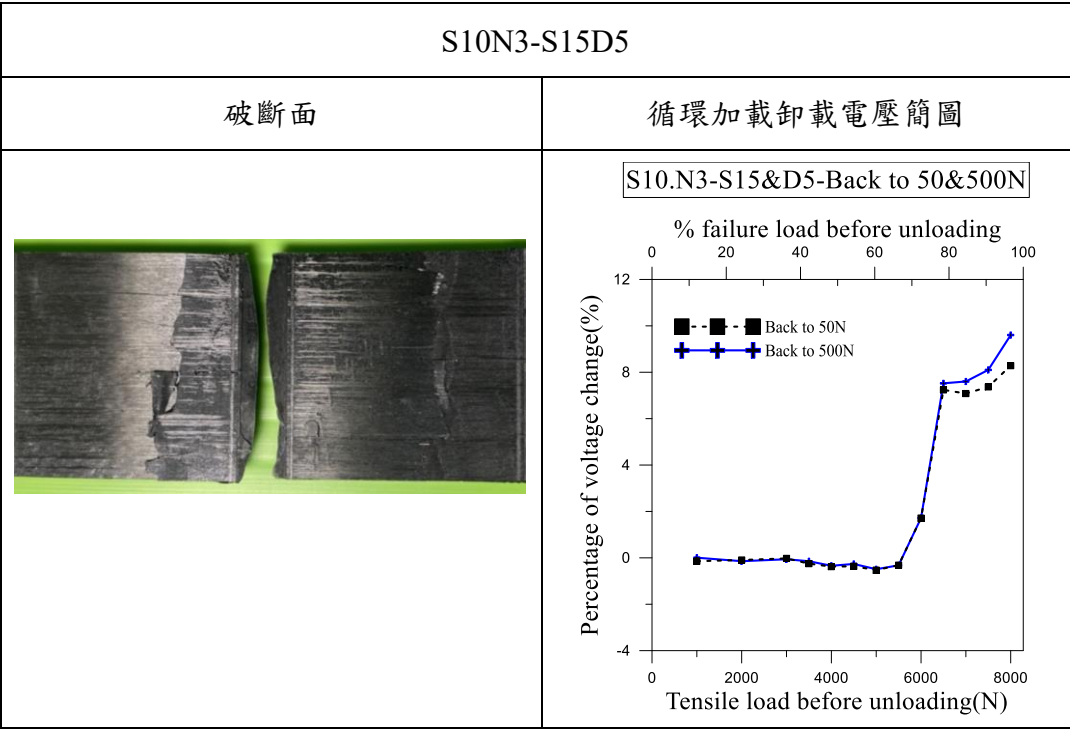
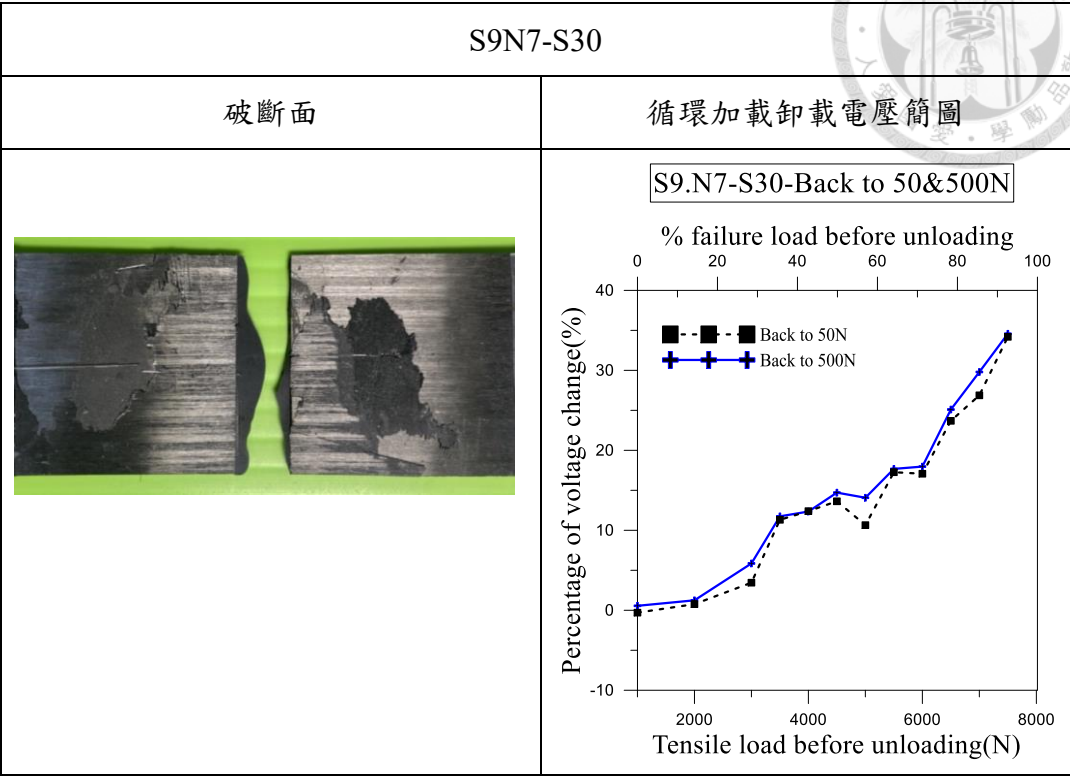


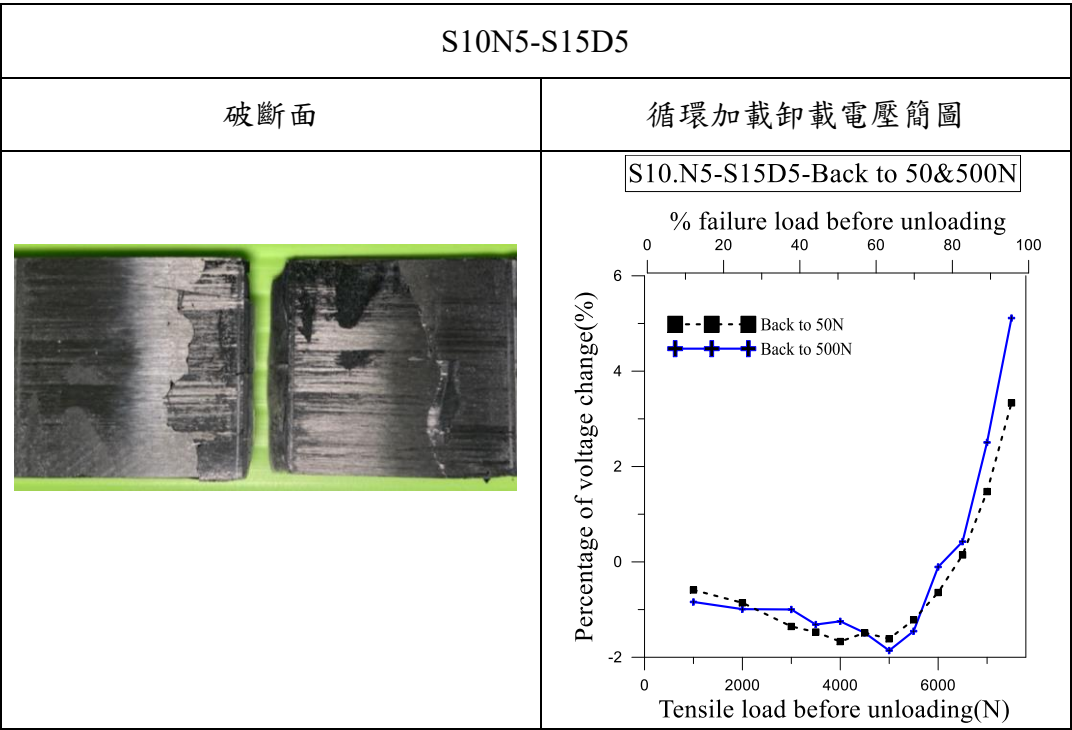
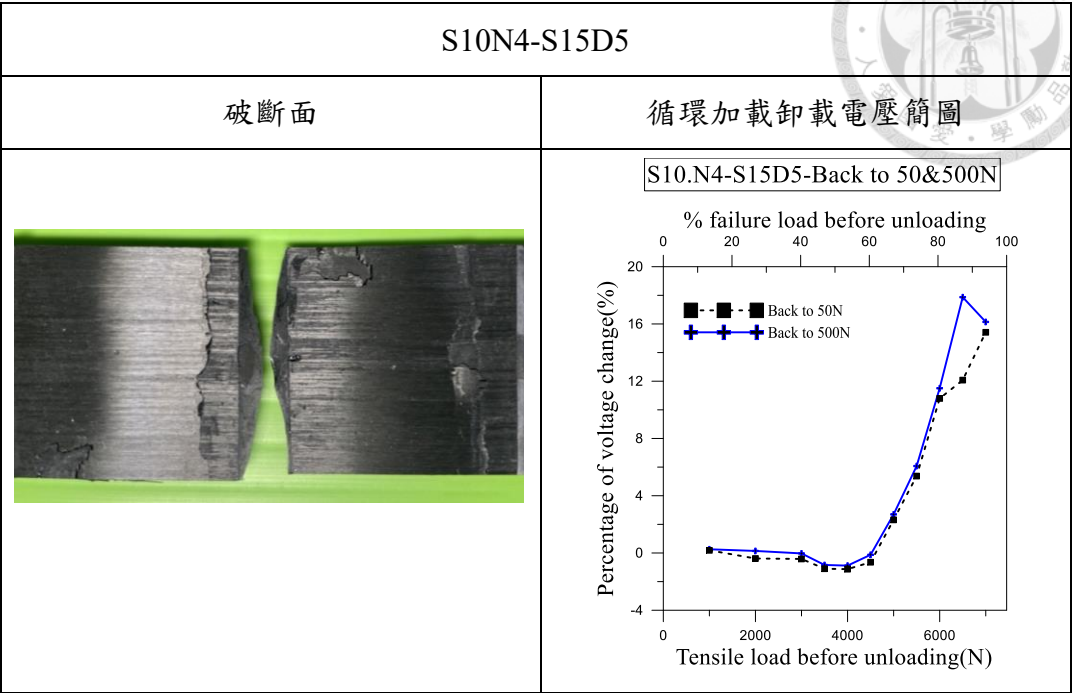


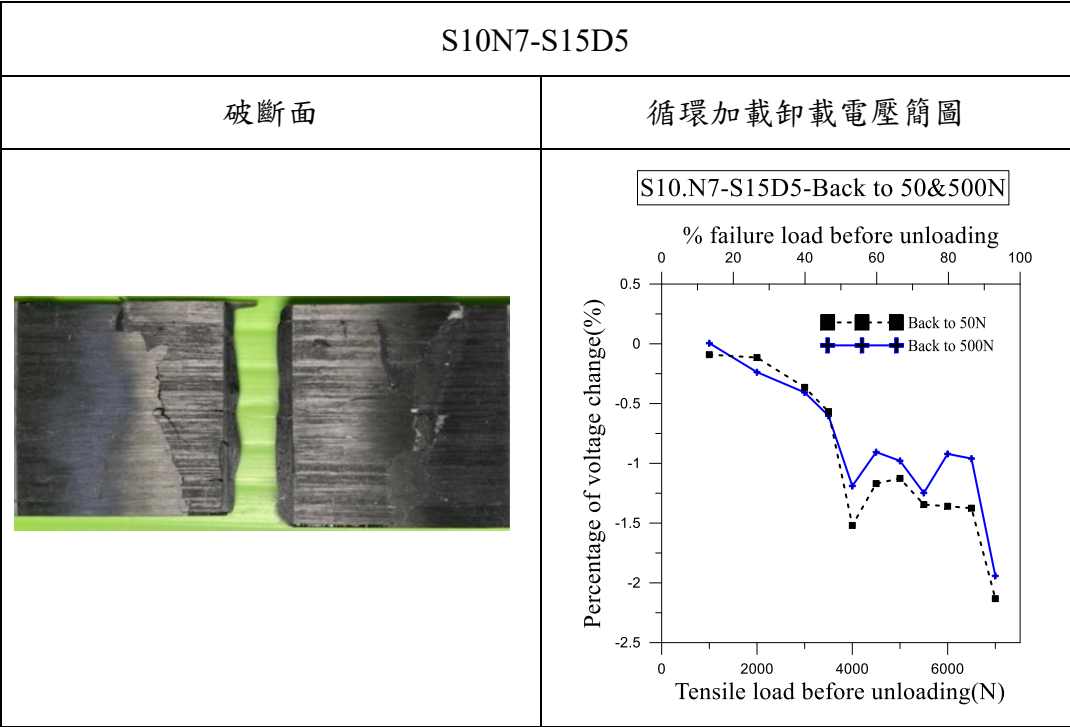
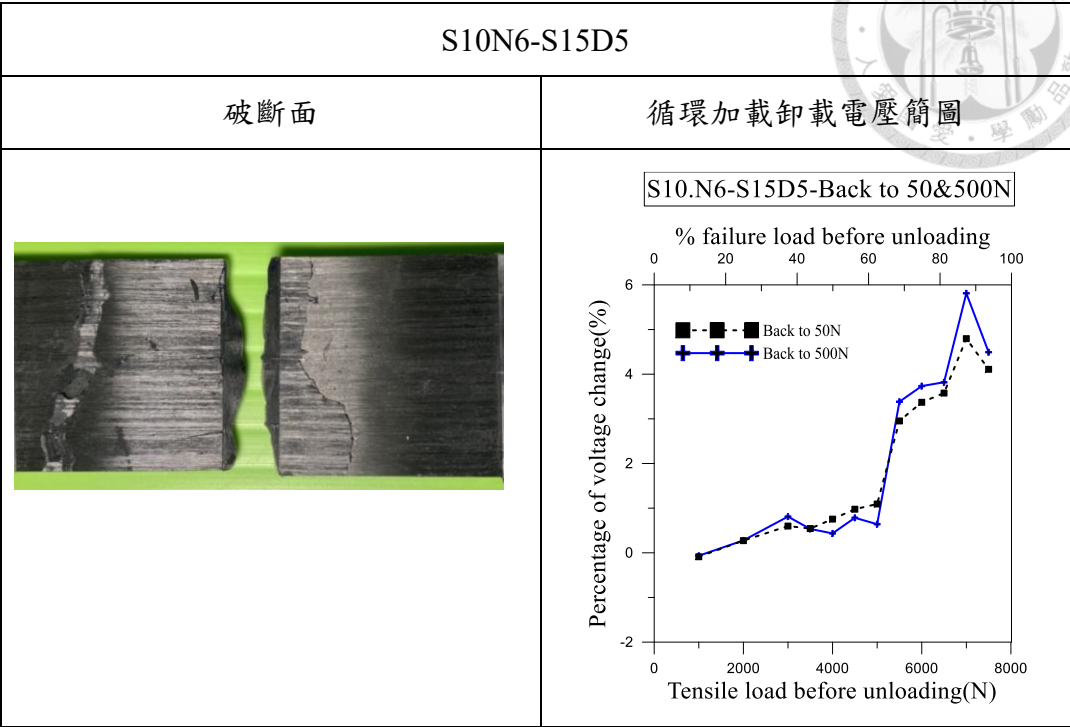


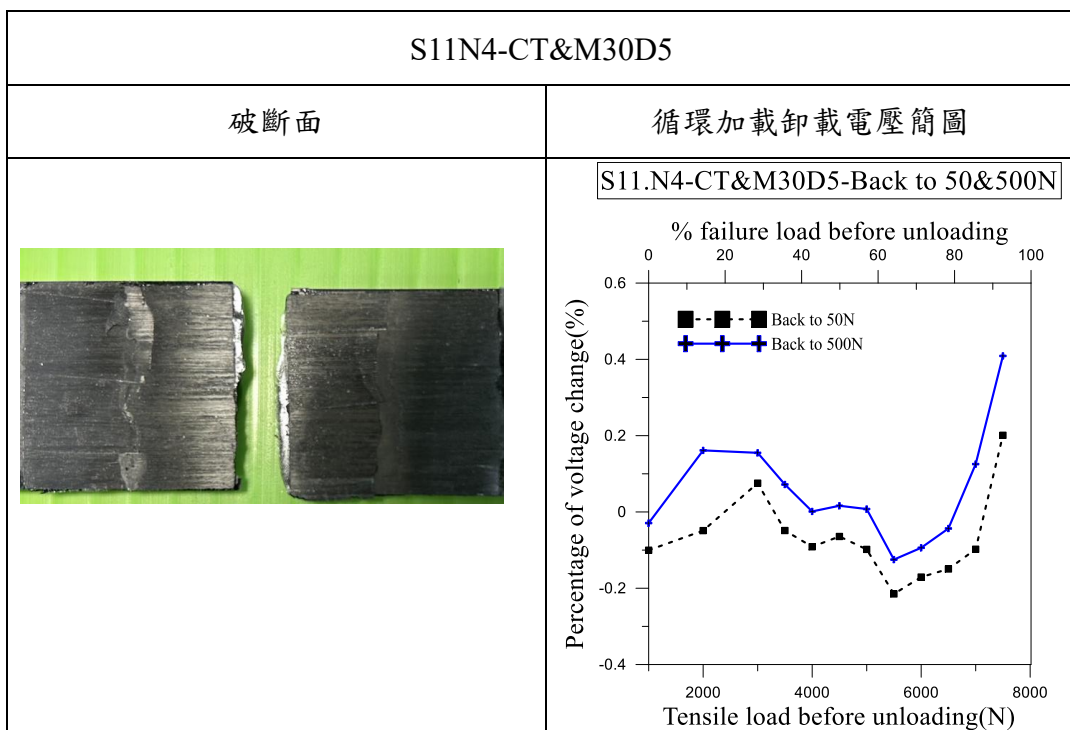
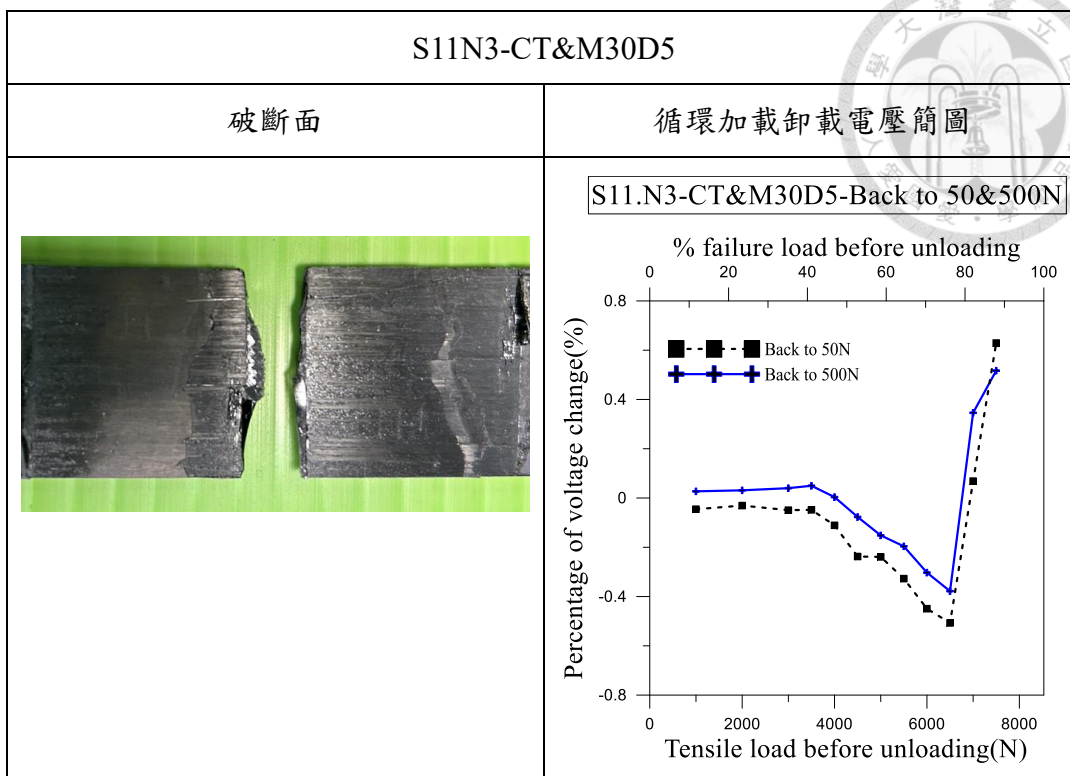


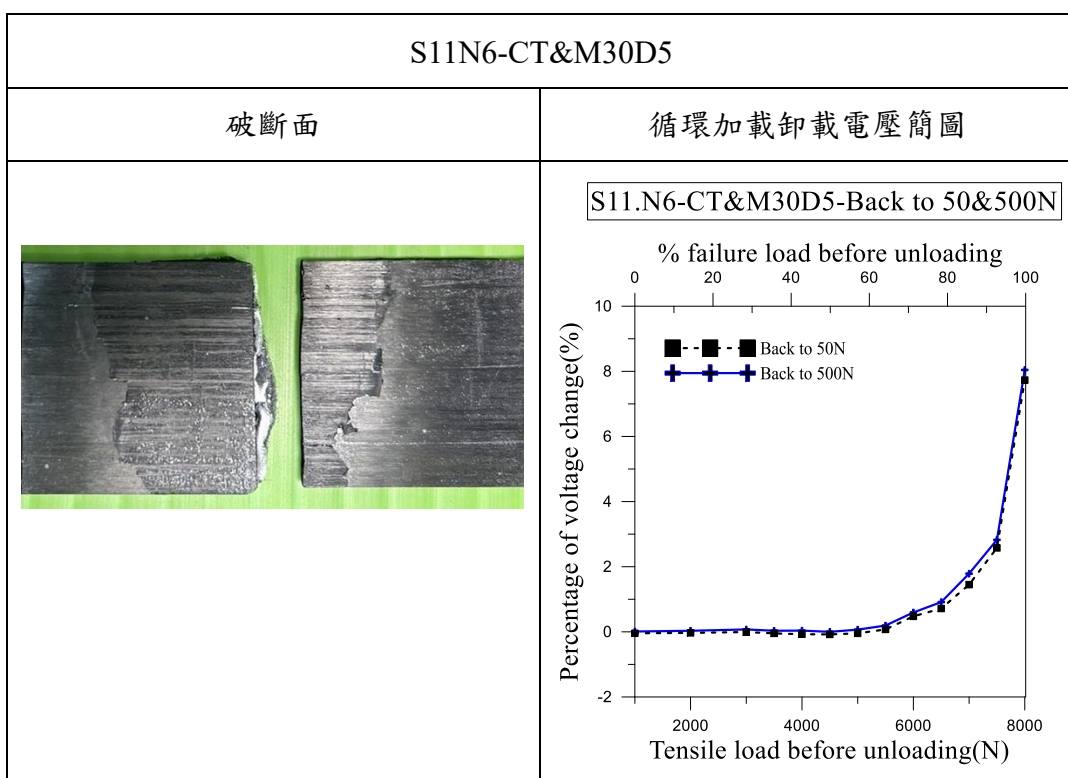
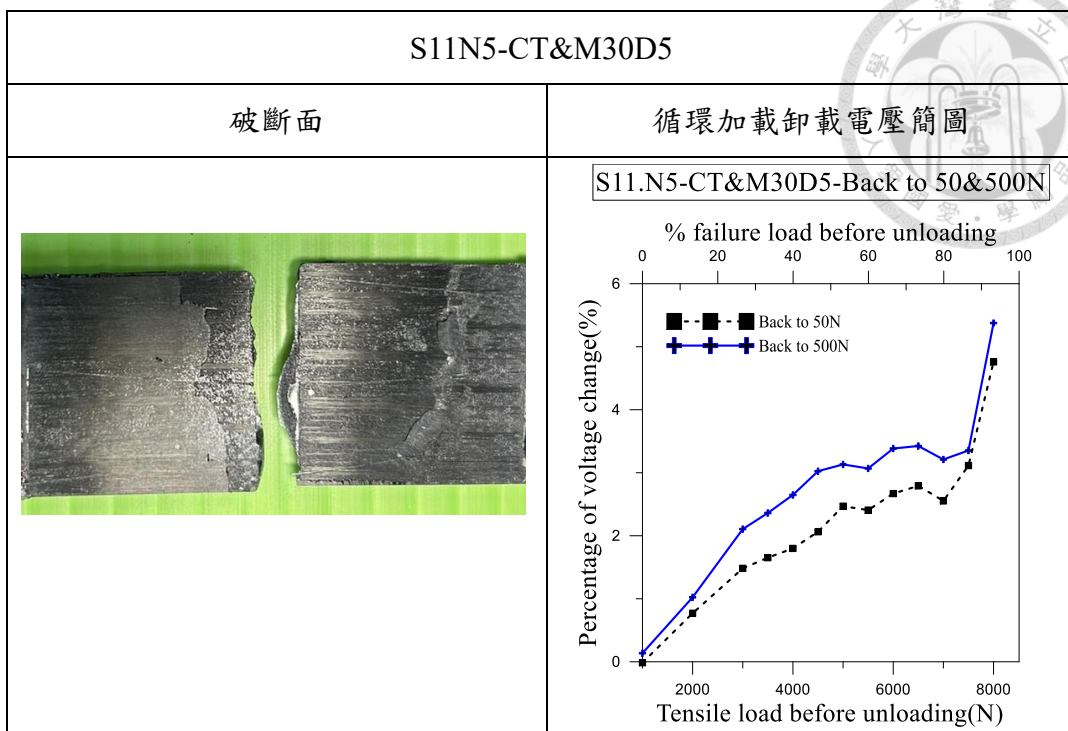


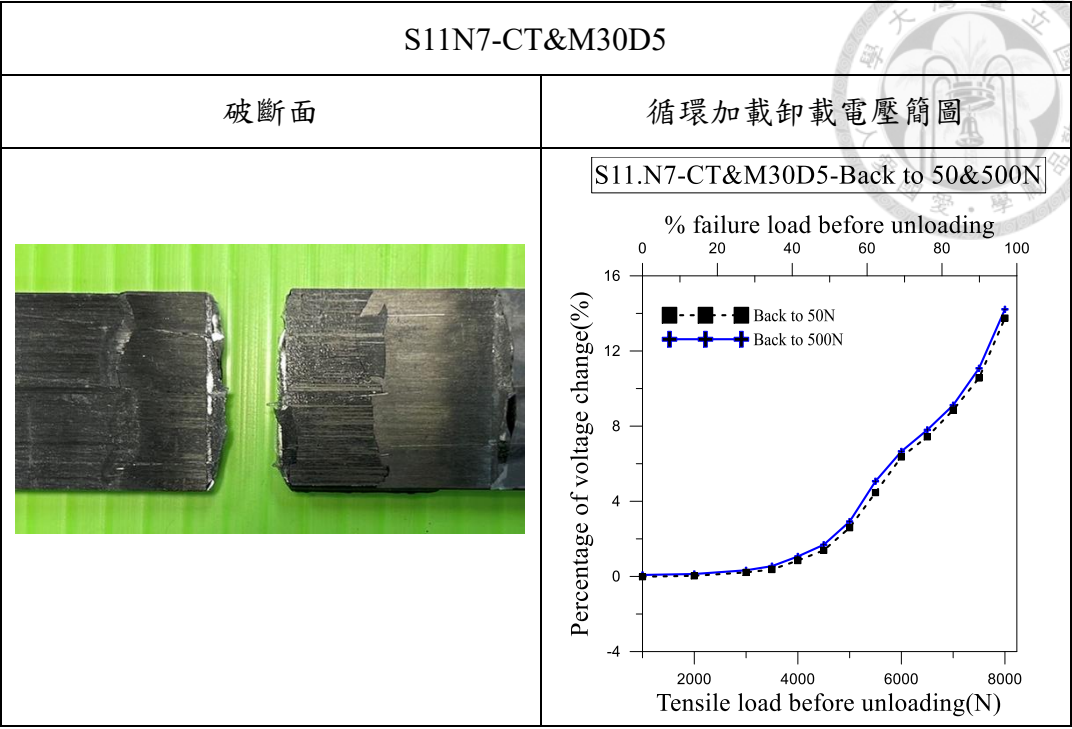








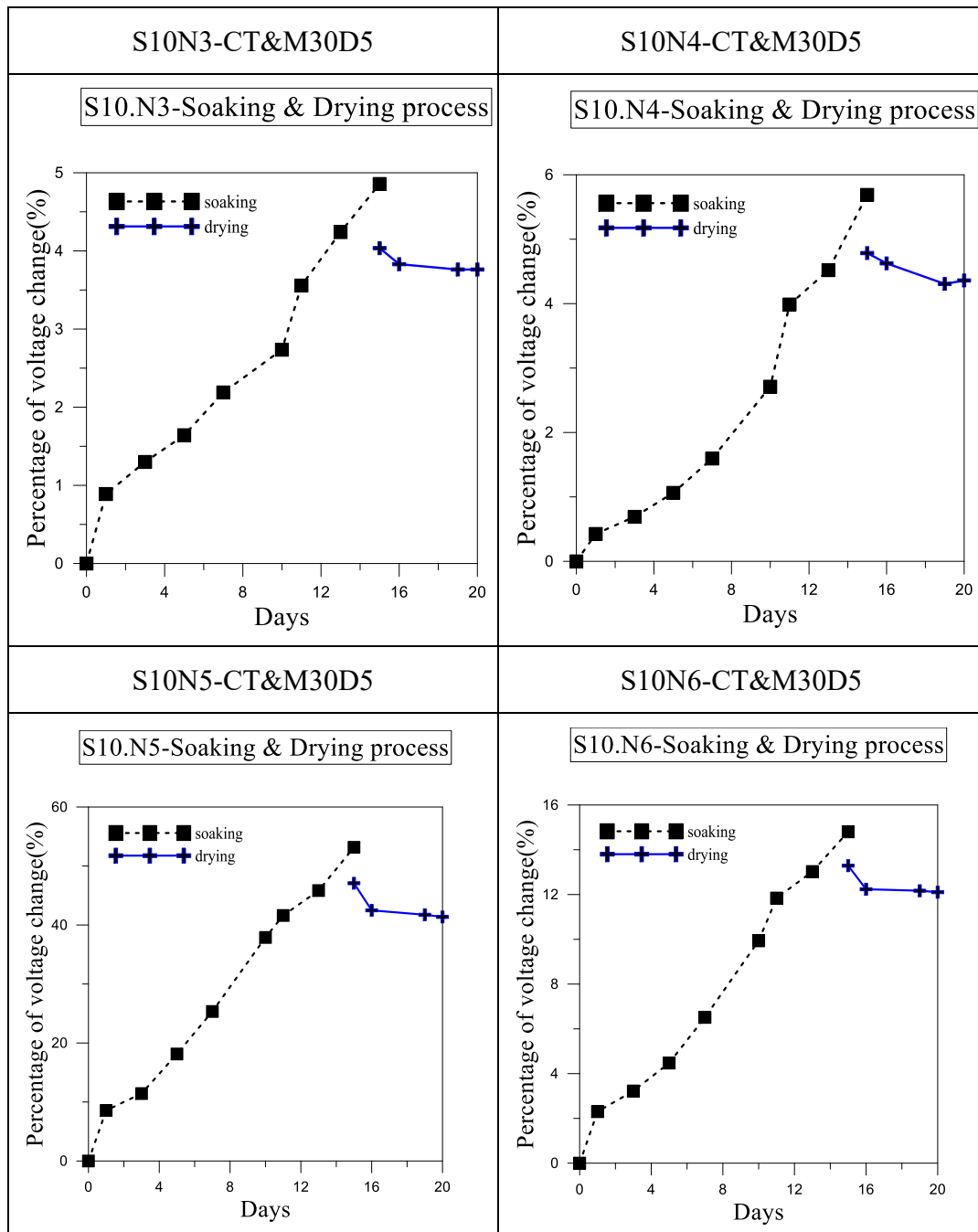


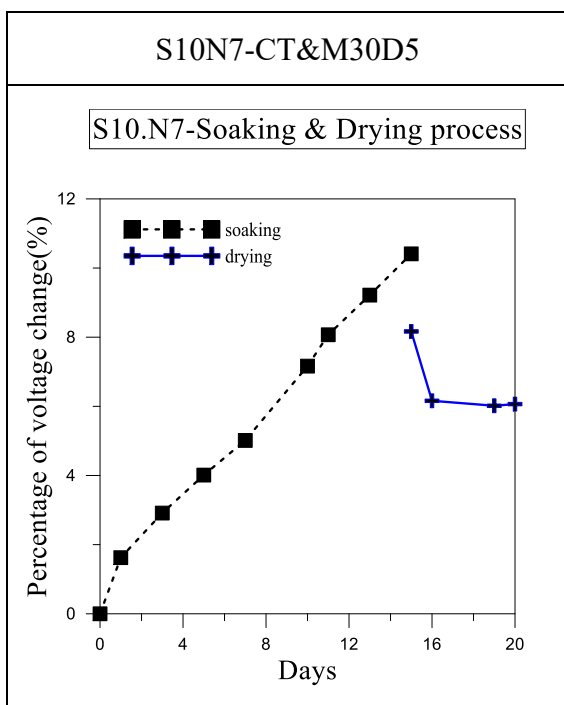


高溫高濕與高溫低濕實驗過程電壓變化

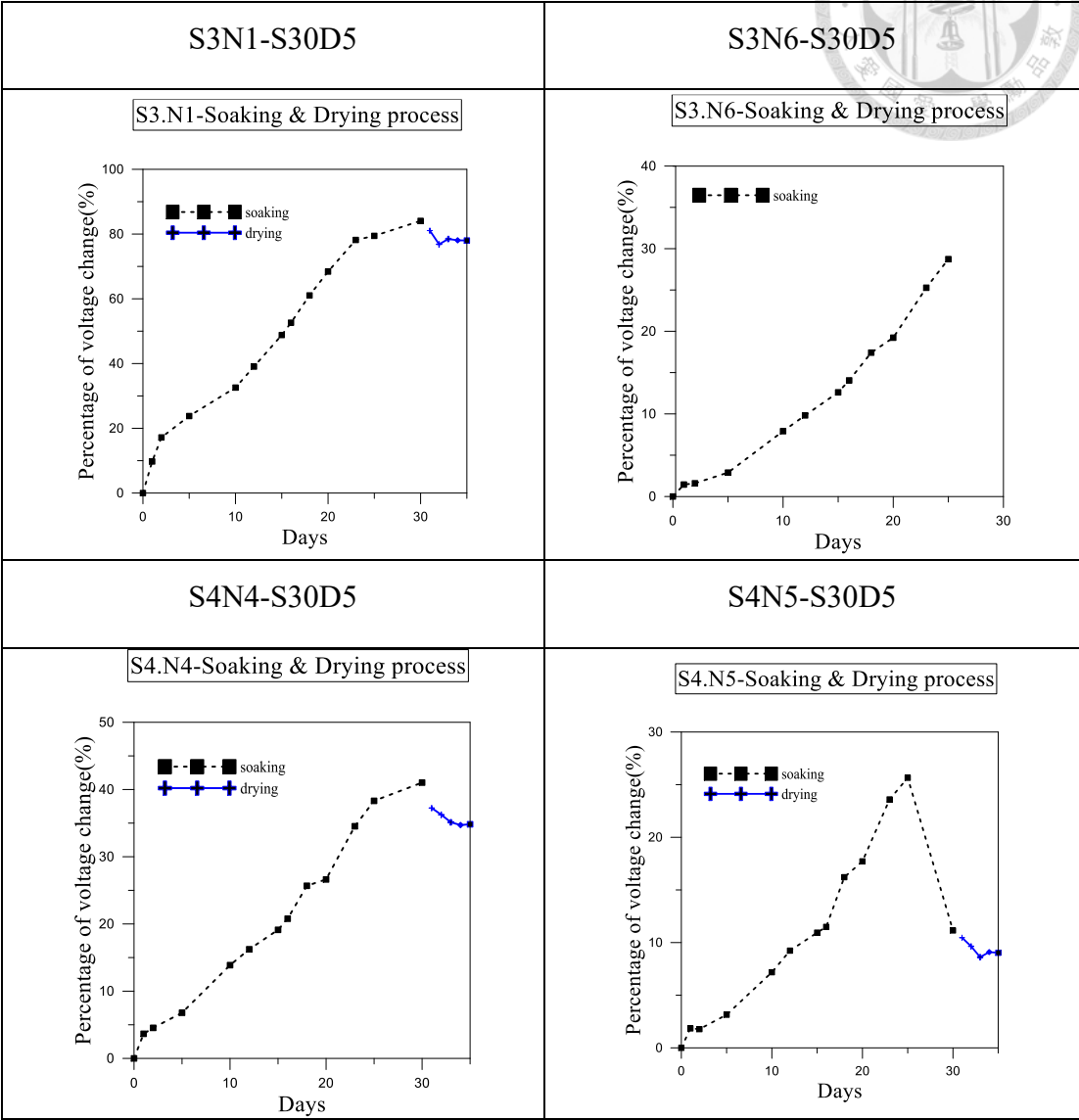
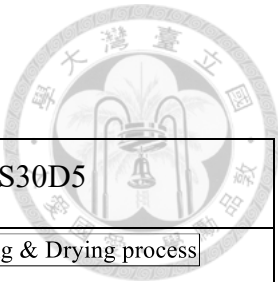


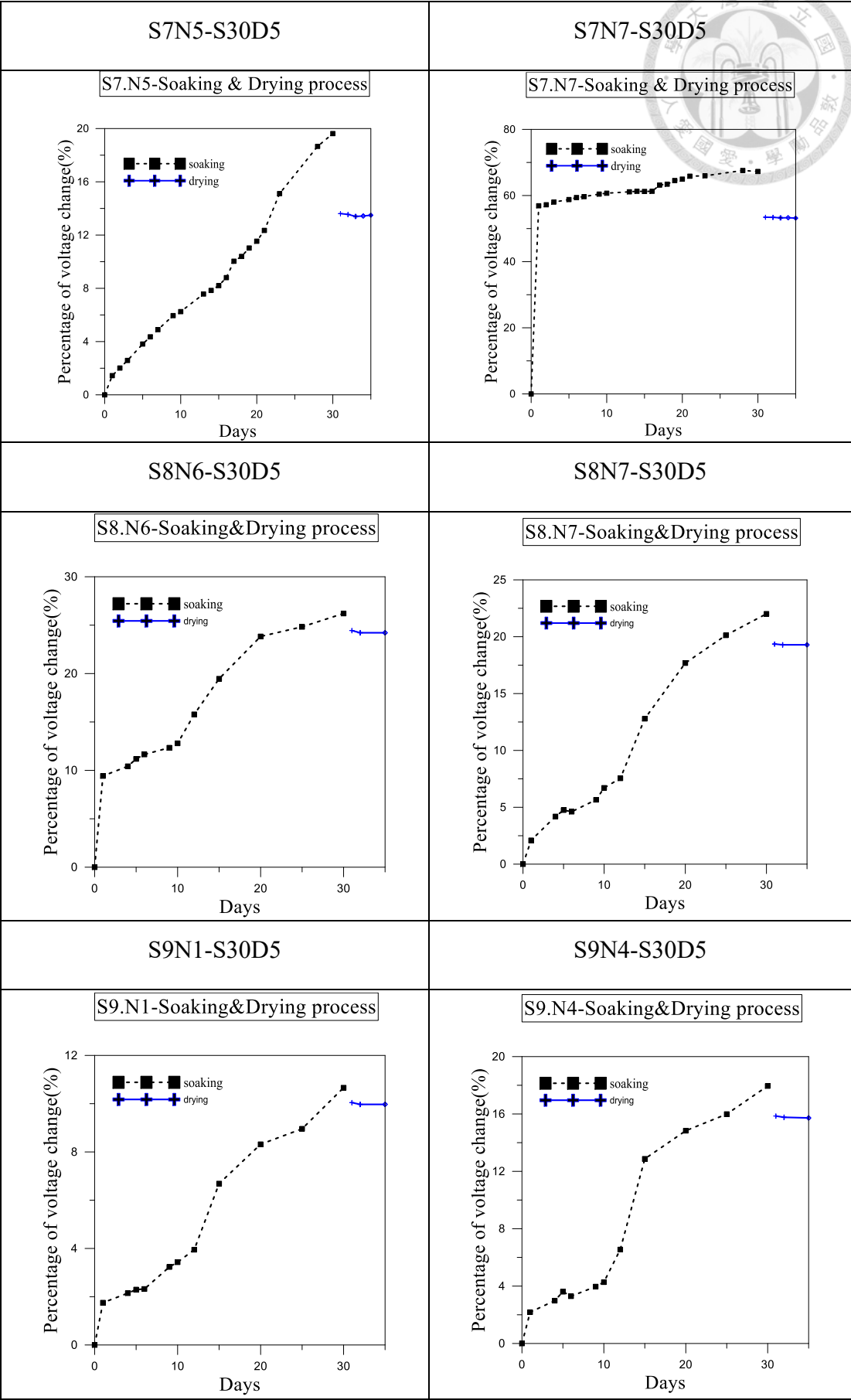
高溫高濕 15 天乾燥 5 天試片



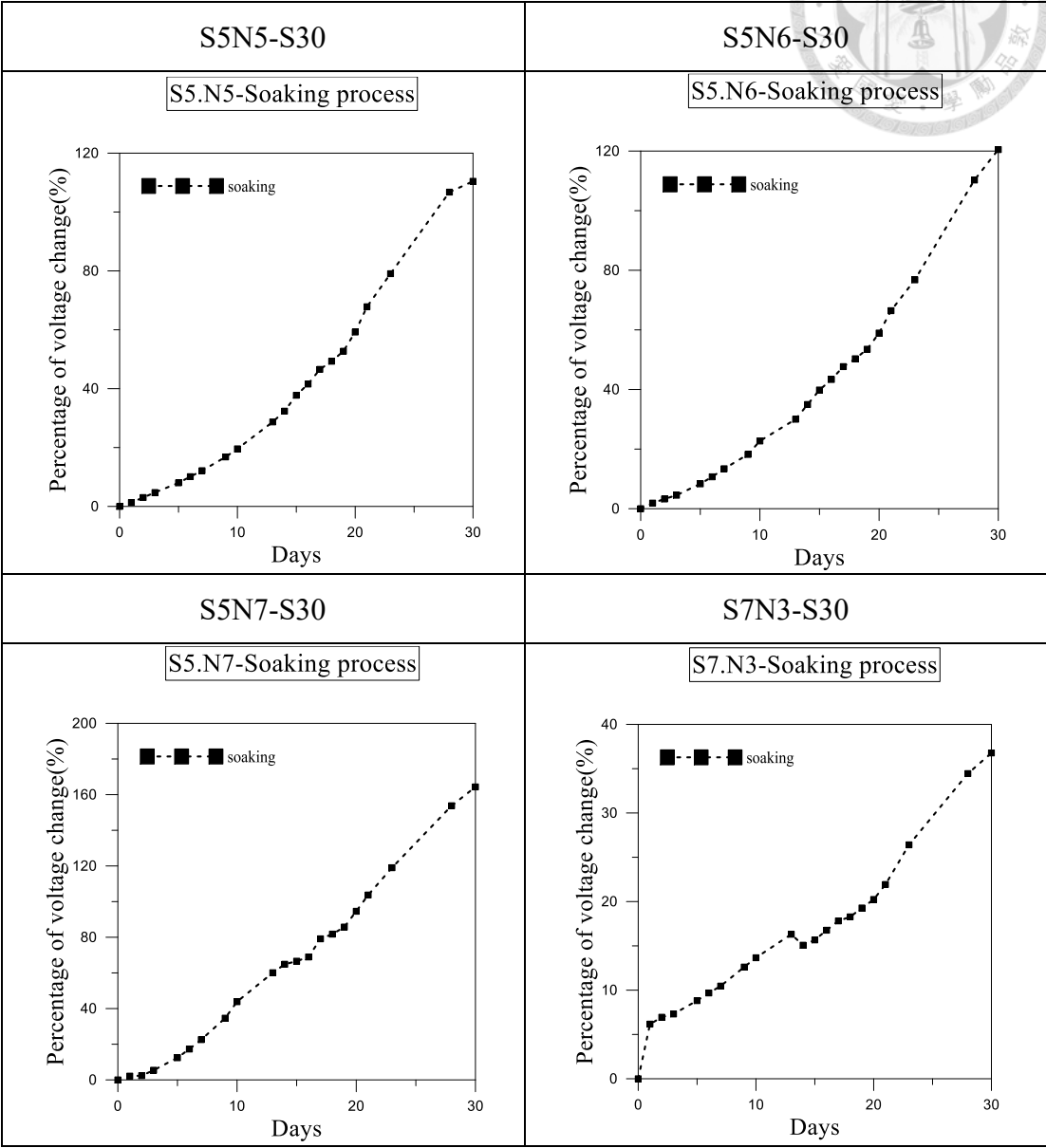
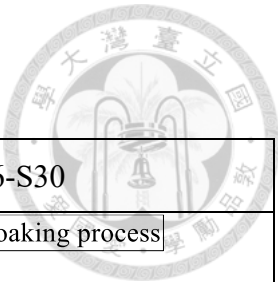


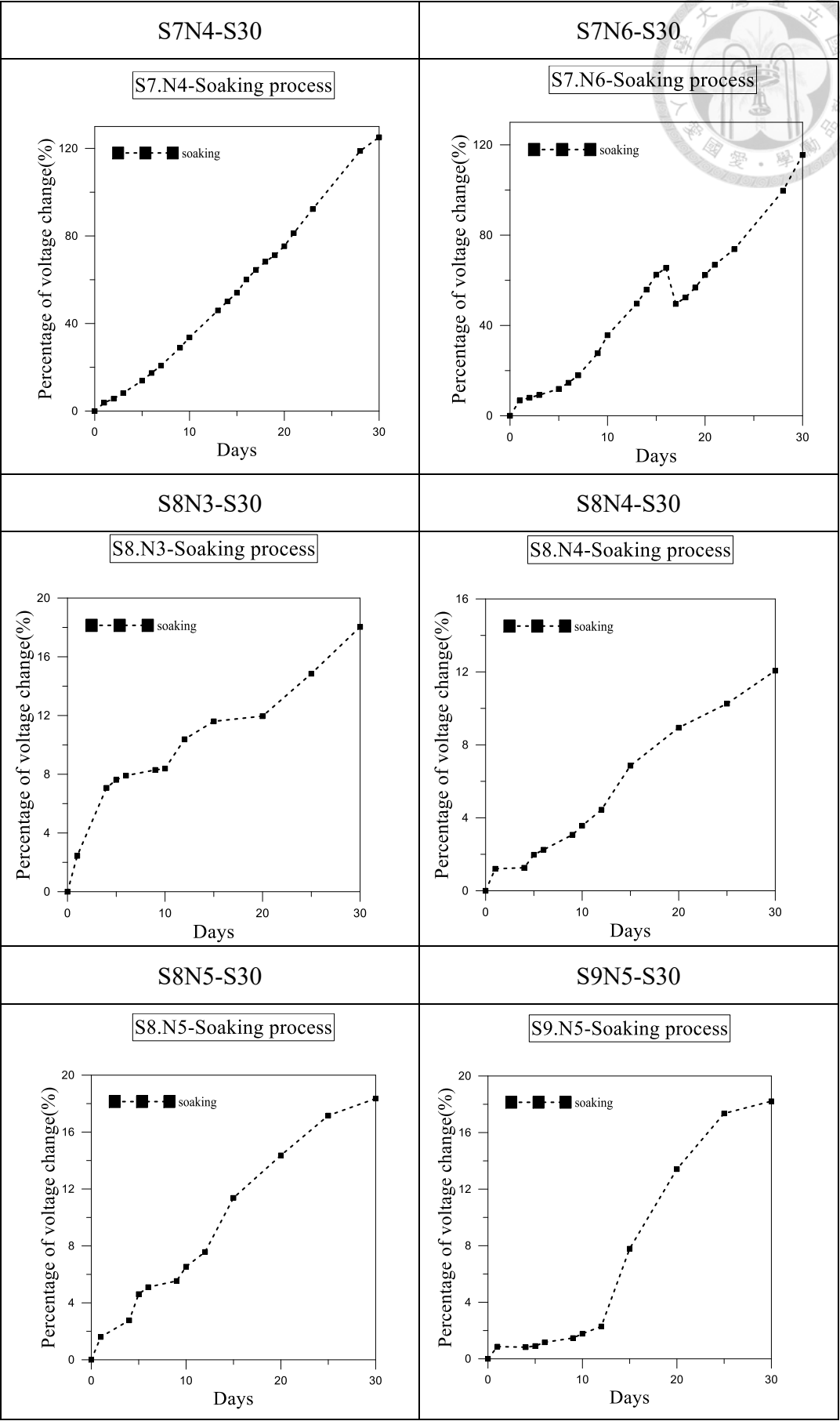
高溫高濕 30 天乾燥 5 天試片

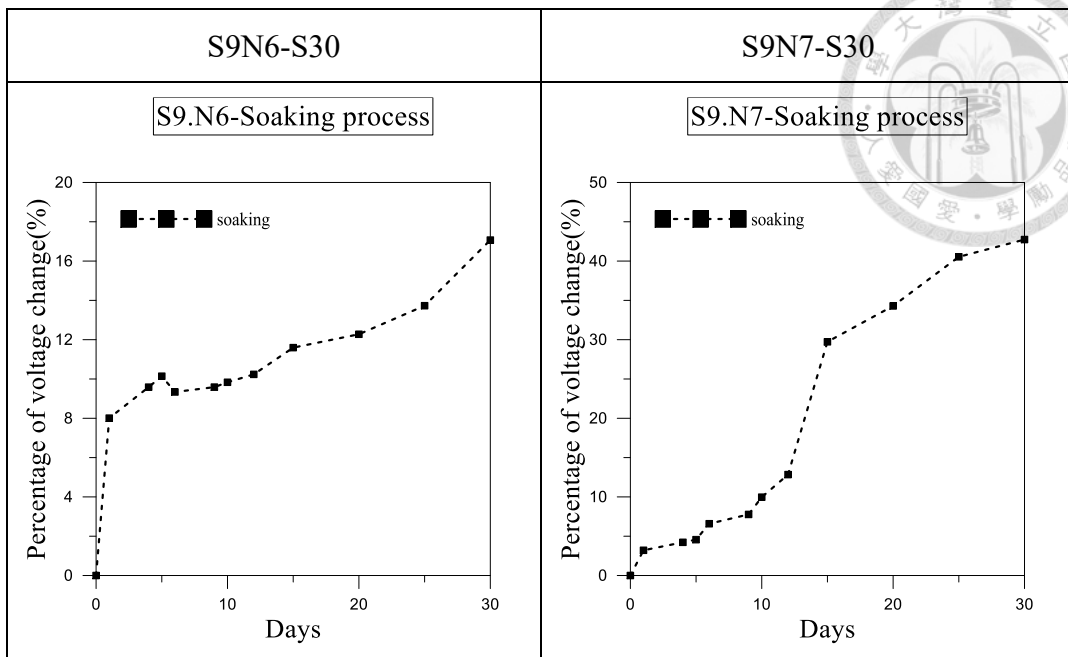




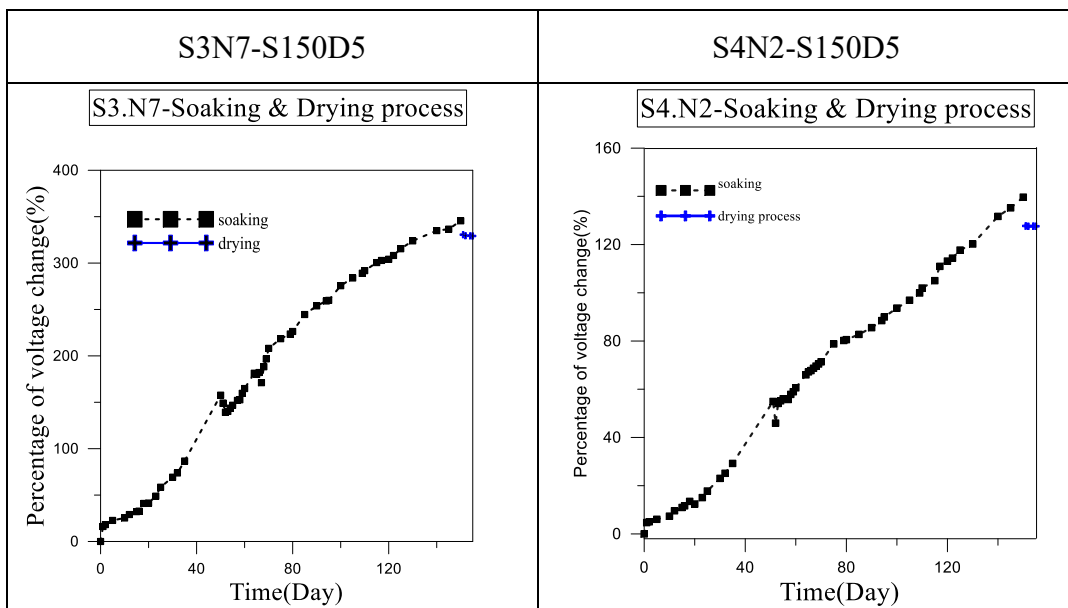
高溫高濕 30 天未乾燥試片



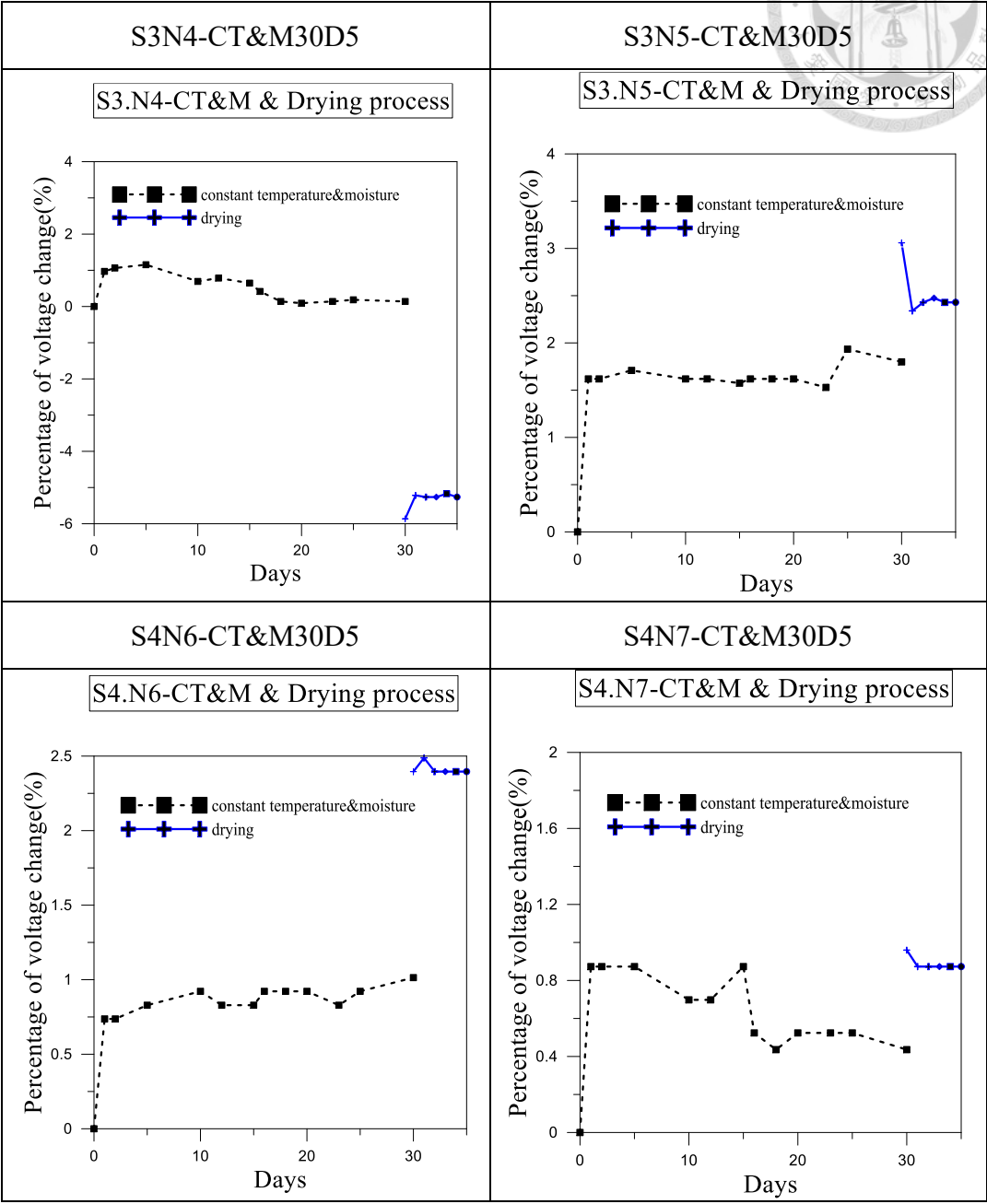
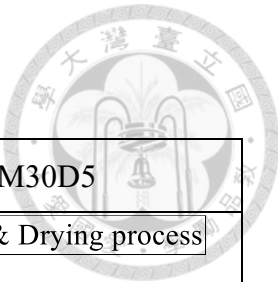


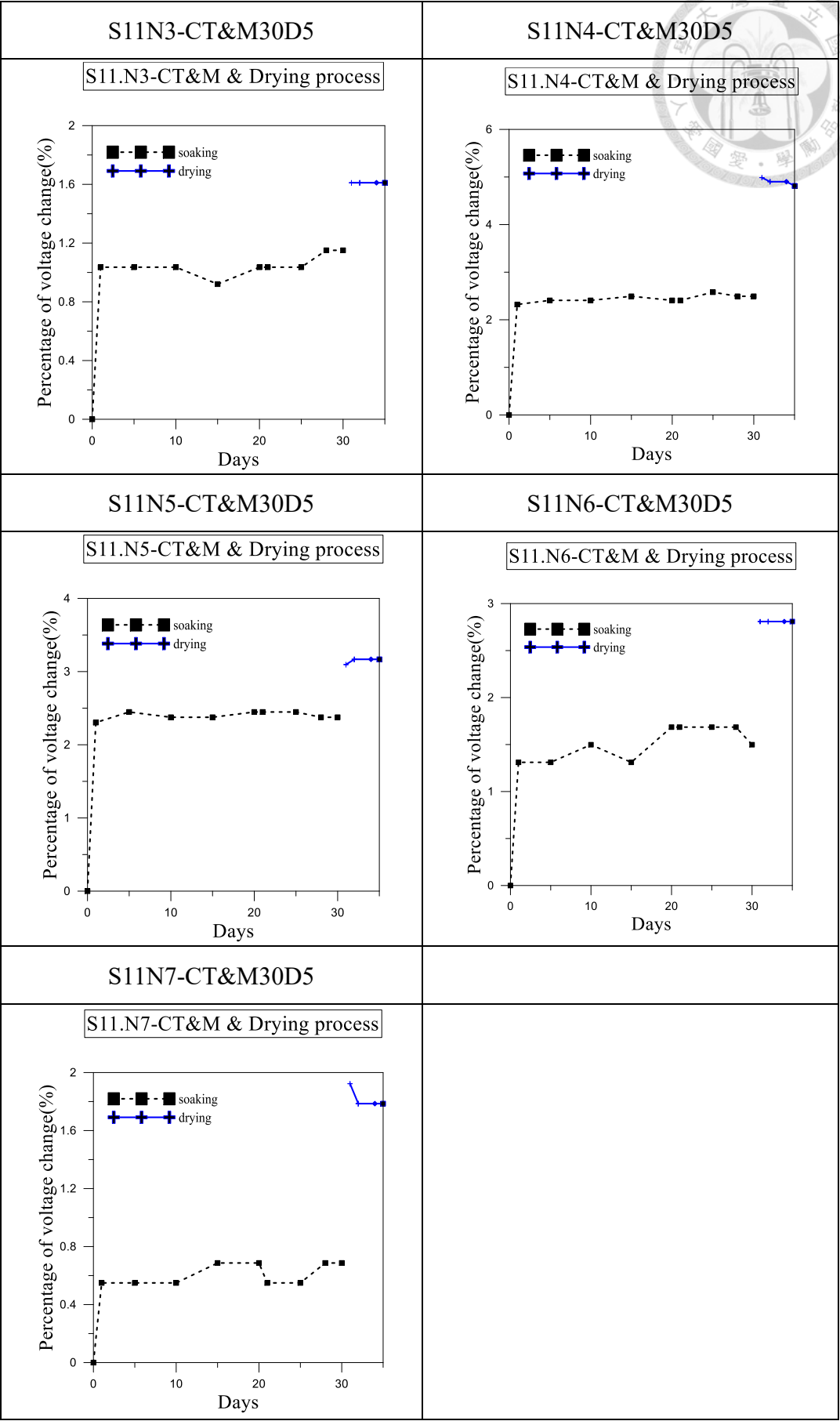


高溫高濕 150 天乾燥 5 天試片



高溫低濕 30 天乾燥 5 天試片







高溫低濕 90 天乾燥 5 天試片

