

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

以導電性與布拉格光柵監測玻纖複材的濕熱老化

Hygrothermal aging monitoring of glass-fiber reinforced
composite by conductivity and FBG

黃康祐

Kang-Yu Huang

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



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

以導電性與布拉格光柵監測玻纖複材的濕熱老化

Hygrothermal aging monitoring of glass-fiber reinforced
composite by conductivity and FBG

本論文係 黃康祐 (R10522546) 在國立臺灣大學 機械工程學系 完成
之碩士學位論文，於民國 112 年 7 月 26 日承下列考試委員審查通過及
口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering
on 26 July 2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by Kang-Yu Huang
(R10522546) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

單秋成
(指導教授 Advisor)

沈銘厚

林長川

任明

系主任/所長 Director:

莊嘉揚



致謝



由衷感謝指導教授 單秋成教授這兩年的指導，在研究期間對我的實驗方法提出建言、點出思考方向，並教導許多實驗上的專業知識與注意事項。感謝 鄭憶中老師其研究生，提供金相顯微鏡。感謝 沈銘原老師及其研究生，提供試片製造技術與碳纖維紙。感謝 江家慶教授，提供布拉格光纖光柵相關器材。

謝謝童歆語學姐與陳亮維學長帶領我熟悉實驗室，教導實驗細節，並分享研究所期間的大小事，留下寶貴有條理的實驗資料讓我反覆參閱，縱使已畢業離開實驗室，仍願意傾聽實驗遇到的問題分享經驗。感謝同學王俊凱在實驗設備設置上出心出力，也在實驗、論文撰寫上進行交流提供意見，讓我們實驗得以持續進行。感謝順亘用心整頓實驗室的環境，也感謝呂芊邑、羅崇榮、名緯、孟宸、維桀一同維持實驗室的運作。

另外還要感謝上緯興業、佐鴻科技、恆立特化、展締科技提供樹脂與奈米碳管相關的技術諮詢與樣品試作。

最後，我要感謝我的家人，不僅提供經濟上的支助，縱使大家都在各自繁忙的時期仍陪伴著我，在我最困難的時候提供鼓勵，度過難關。

摘要

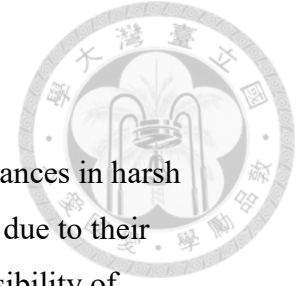


複合材料由於出色的抗腐蝕能力，被用於高溫高濕等惡劣作業環境的器具材料。本研究旨在探討以電阻監測複合材料濕熱老化程度的可行性，將環氧樹脂混和奈米碳管作為基材，製成具導電性的玻纖複材，分別放置於高濕度、低濕度、高溫低濕、熱水中不同的環境，並進行拉伸測試，監測其電阻變化，輔以內埋布拉格光纖光柵的頻譜變化。

研究發現試片浸泡熱水在前 4 天顯著頻譜往長波長飄移、電阻上升，之後逐漸穩定，且回室溫後頻譜波形、飄移、電阻皆未恢復為浸泡熱水前的狀態；另外，浸泡熱水 4 天後降回室溫的電阻接近 60°C 時的，類似高溫低濕後降溫的表現，而 30、75 天後降溫期間電阻上升一致的程度。強度也是在浸泡熱水 4 天後顯著下降，浸泡熱水 30 天與 75 天僅比浸泡熱水 4 天些許下降。表示電阻有感測溫濕老化發展的潛力。未來進行更多中短天期的實驗或許能建立電阻變化與強度下降的關聯。

關鍵字：玻璃纖維複合材料、濕熱老化、奈米碳管、布拉格光纖光柵、電阻監測

Abstract



Glass-fiber reinforced composite are used as materials for appliances in harsh operating environments such as high temperature and high humidity due to their excellent corrosion resistance. This study aims to investigate the feasibility of monitoring the degree of hygrothermal aging of composite by electrical properties. Epoxy resin mixed with carbon nanotubes were used as the substrates to produce electrically conductive glass-fiber-reinforced polymers, which were placed in different environments, such as high-humidity, low-humidity, high-temperature, low-humidity, and hot water respectively, and then were subjected to tensile tests to monitor the changes in electrical resistance, which were supplemented by the changes in the spectrum of the embedded Fiber Bragg Gratings.

It was found that the spectrum of the specimen immersed in hot water drifted towards long wavelengths and the resistance increased in the first 4 days, and then stabilized gradually, and the spectral waveforms, drift, and resistance did not return to the state before immersion in hot water after returning to the room temperature. In addition, the resistance at room temperature after 4 days of immersion in hot water is close to that at 60°C, which is similar to that after high temperature and low humidity treatment, and the resistance rises to the same degree during the cooling period after 30 or 75 days. The strength also decreases significantly after 4 days of immersion in hot water, and it only decreases slightly after 30 and 75 days of immersion compared with 4 days of immersion in hot water. This indicates that the resistance has the potential to sense the development of hygrothermal aging. In the future, more short or medium term of experiments may be able to establish the correlation between resistance change and strength decrease.

Keywords: glass-fiber reinforced composite, hygrothermal aging, carbon nanotubes, Fiber Bragg Gratings, electricity monitoring

目錄



致謝	i
摘要	ii
Abstract	iii
目錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	xi
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	1
第二章 文獻回顧	3
2.1 複合材料的濕熱老化機制	3
2.2 以電性監測複材老化	3
2.3 奈米碳管複合材料	4
2.3.1 奈米碳管	4
2.3.2 奈米碳管網路的電阻性質	4
2.3.3 奈米碳管複合材料的壓阻效應(piezoresistance effect)	5
2.3.4 溫度對奈米碳管複合材料電阻的影響	6
2.3.5 濕度對奈米碳管複合材料電阻的影響	6
2.3.6 奈米碳管應用於複合材料損傷監測	6
2.4 布拉格光纖光柵	7
2.4.1 光纖簡介	7
2.4.2 光通信功率單位	8

2.4.3 布拉格光纖光柵的原理	9
2.4.4 布拉格光纖光柵的響應	9
2.4.5 布拉格光纖光柵的應用	11
2.5 文獻回顧總結	12
第三章 實驗材料與設備	13
3.1 試片材料	13
3.2 試片製造相關設備	14
3.3 試驗與量測設備	17
第四章 實驗方法與流程	21
4.1 試片製作方法	21
4.1.1 真空輔助樹脂轉注布置	21
4.1.2 混和樹脂與奈米碳管	23
4.1.3 固化及後續配置準備	23
4.2 試片的材料參數	24
4.3 頻譜光路	24
4.4 實驗存放處理	25
4.4.1 浸泡熱水處理	25
4.4.2 乾燥處理	25
4.4.3 高溫低濕處理	26
4.4.4 實驗存放處理期間電阻量測方式	26
4.5 拉伸測試	26
4.6 試片與實驗處理代號	26
4.7 實驗架構	27
4.7.1 樹脂固化的頻譜變化	27
4.7.2 探討濕氣影響	27

4.7.3 老化監測	28
4.7.4 內埋碳纖維紙對電阻監測的幫助	29
第五章 實驗結果與討論	31
5.1 固化導致的頻譜變化	31
5.2 濕氣的影響	31
5.2.1 存放期間	31
5.2.2 拉伸測試	33
5.2.3 濕氣影響總結	40
5.3 老化監測	40
5.3.1 高溫低濕處理的影響	40
5.3.2 浸泡熱水處理的影響	47
5.3.3 不同處理後拉伸破斷外觀	54
5.3.4 老化監測總結	69
5.4 內埋碳纖維紙對電阻監測的幫助	69
5.4.1 不同處理期間的電阻變化	69
5.4.2 拉伸測試	72
5.4.3 內埋碳纖維紙試片總結	74
第六章 結論與未來展望	75
參考文獻	76
附錄	80

圖目錄



圖 2.1 聚合物基材中的 CNT 網絡圖示[28].....	5
圖 2.2 CNT 複合材料壓阻效應機制示意圖[38].....	5
圖 2.3 SEM 圖像：(左)裂縫於 90°疊層中；(右)環氧樹脂基材中的 CNTs[51]	7
圖 2.4 在遞增循環負載下用 90°中間疊層的交叉疊層層板複合材料的損傷產生與 發展研究：(a)循環負載下的電阻響應；(b)聚焦於第五次循環的電阻響應[51]7	
圖 2.5 多模光纖與單模光纖差異示意圖[56].....	8
圖 2.6 寬頻光源通過布拉格光纖光柵示意圖[59].....	9
圖 2.7 FBG 在(a)單軸向 (b)多軸向 應力下的響應[61]	10
圖 2.8 FBG 在不均勻應變場下的響應[61]	10
圖 2.9 FBG 吸收水分後的啁啾化現象[20]	12
圖 3.1 (左)環氧樹脂主劑；(右)環氧樹脂固化劑	13
圖 3.2 單向玻璃纖維布	13
圖 3.3 碳纖維紙	14
圖 3.4 墊片	14
圖 3.5 超音波打碎機：(左)外觀；(右)刀頭特寫	15
圖 3.6 真空幫浦	15
圖 3.7 均質機：(左)各個零件；(右)刀頭特寫	16
圖 3.8 攪拌機	16
圖 3.9 光纖切割機	17
圖 3.10 光纖熔接機	17
圖 3.11 萬能材料試驗機	18
圖 3.12 恆溫恆濕箱	18
圖 3.13 恆溫水槽	19
圖 3.14 光頻譜分析儀	19
圖 3.15 寬頻光源	19
圖 3.16 電源電錶	20
圖 3.17 資料擷取設備	20

圖 3.18 溫溼度計	20
圖 4.1 用矽膠包覆光纖	21
圖 4.2 織布、內埋物與抽氣管路擺放	22
圖 4.3 離模布、導流網、進樹脂管路擺放	22
圖 4.4 轉注布置完成並抽真空	23
圖 4.5 準備完成的試片	24
圖 4.6 試片存放於乾燥袋	25
圖 4.7 S2N4 浸泡熱水 75 天後，從 60°C 降溫至室溫不須 10 分鐘.....	28
圖 5.1 S9N7 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；(右) 後固化期間的頻譜變化	31
圖 5.2 S9 存放於實驗室組，存放期間頻譜變化：(左)S9N2；(右)S9N7.....	32
圖 5.3 S9 存放於實驗室組，存放期間頻譜變化	32
圖 5.4 S9 存放於乾燥箱組，存放期間 (左)頻譜變化 (右)電阻變化	33
圖 5.5 S9 存放於乾燥袋組，存放期間 (左)頻譜變化 (右)電阻變化	33
圖 5.6 S9N4 即刻拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N	35
圖 5.7 S9N8 即刻拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N	36
圖 5.8 S9N2 於實驗室 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N ..	36
圖 5.9 S9N1 於乾燥箱 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N ..	36
圖 5.10 S9N3 於乾燥袋 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N	37
圖 5.11 S9N4 即刻拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	37
圖 5.12 S9N8 即刻拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	37
圖 5.13 S9N2 於實驗室環境 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	38
圖 5.14 S9N7 於實驗室環境 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	38
圖 5.15 S9N1 於乾燥箱 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	38
圖 5.16 S9N5 於乾燥箱 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	39
圖 5.17 S9N3 於乾燥袋 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	39
圖 5.18 S9N6 於乾燥袋 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	39
圖 5.19 S8N1 於乾燥袋中升溫期間頻譜變化.....	40
圖 5.20 S8 於乾燥袋中組，升溫期間頻譜變化	41

圖 5.21 S2N1 高溫低濕 75 天期間頻譜變化.....	41
圖 5.22 S2N1 與 S2N6 高溫低濕 75 天期間電阻變化	42
圖 5.23 S2N1 高溫低濕 75 天後降溫期間頻譜變化.....	42
圖 5.24 S2 高溫低濕組，高溫低濕 75 天後降溫期間電阻變化	43
圖 5.25 S7N1 高溫低濕 4 天後降溫期間頻譜變化.....	43
圖 5.26 S7 高溫低濕組，高溫低濕 4 天後降溫期間電阻變化	43
圖 5.27 S2N1 高溫低濕 75 天前後頻譜變化.....	44
圖 5.28 S8N2 高溫低濕 30 天前後頻譜變化.....	44
圖 5.29 S8 高溫低濕組，高溫低濕 30 天後乾燥期間電阻變化	45
圖 5.30 S2N1 高溫低濕 75 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N	46
圖 5.31 S2N1 高溫低濕 75 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載.....	47
圖 5.32 S2N4 升溫頻譜變化.....	48
圖 5.33 S2N4 浸泡熱水 75 天期間頻譜變化.....	48
圖 5.34 批次 S2 浸泡熱水處理試片，於浸泡熱水處理期間電阻變化	48
圖 5.35 S2N4 浸泡熱水 75 天 (左)後降溫頻譜變化 (右)前後頻譜變化.....	49
圖 5.36 降溫電阻變化：(左)S2 浸泡熱水處理 30、75 天後；(右)S7 浸泡熱水處理 4 天後	49
圖 5.37 S8N4 浸泡熱水 30 天 (左)後乾燥期間 (右)泡水前後 頻譜變化.....	50
圖 5.38 S8 浸泡熱水 30 天後乾燥期間電阻變化	50
圖 5.39 浸泡熱水不後乾燥的試片，浸泡熱水後回室溫的電阻與強度關聯	53
圖 5.40 S3N5 浸泡熱水 30 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N	53
圖 5.41 S3N5 浸泡熱水 30 天後乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N.....	53
圖 5.42 難以用拉伸時的電阻變化判斷濕熱老化程度	54
圖 5.43 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a)放大倍率 100 倍；(b)放大倍率 3000 倍.....	56
圖 5.44 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a) 放大倍率 100 倍；(b)放大倍率 3000 倍	57
圖 5.45 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面部分 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a) 放大	

倍率 80 倍；(b)放大倍率 3000 倍	58
圖 5.46 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂：實線框為類似人字文特徵的位置，虛線框為光亮斷面位置	59
圖 5.47 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂有類似人字文的特徵與塑性變形產物：(a)放大倍率 1000 倍；(b)放大倍率 3000 倍	60
圖 5.48 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂光亮斷面與塑性變形產物：(a)放大倍率 300 倍；(b)放大倍率 3000 倍	61
圖 5.49 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層樹脂特徵位置	62
圖 5.50 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層樹脂有些紋路與塑性變形產物：(a)放大倍率 600 倍；(b)放大倍率 3000 倍	63
圖 5.51 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面 0 度層樹脂特徵位置	64
圖 5.52 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面 0 度層樹脂有些紋路與塑性變形產物：(a)放大倍率 400 倍；(b)放大倍率 2500 倍	65
圖 5.53 S3N3 僅乾燥處理後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 50 倍；(b)放大倍率 3000 倍	66
圖 5.54 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 40 倍；(b)放大倍率 3000 倍	67
圖 5.55 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 150 倍；(b)放大倍率 3000 倍	68
圖 5.56 S5 乾燥期間其中三片試片電阻變化	70
圖 5.57 S5 升溫階段電阻變化	70
圖 5.58 S5 高溫低濕期間電阻變化：(左)第 1 天內；(右)0 至 30 天	70
圖 5.59 S5 高溫低濕 30 天後降溫電阻變化	71
圖 5.60 S5 浸泡熱水期間電阻變化：(左)第 1 天內；(右)0 至 30 天	71
圖 5.61 S5 浸泡熱水 30 天後降溫電阻變化	71
圖 5.62 S5N2 循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載	73
圖 5.63 S5N1 乾燥後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載	73
圖 5.64 (左)S5N3 (右)S5N6 浸泡熱水 30 天後循環拉伸電阻變化	73

表目錄



表 4.1 實驗處理代號對照表	27
表 4.2 各實驗處理所對應的試片	29
表 5.1 S9 存放於不同環境後的試片強度	34
表 5.2 S9 存放於不同環境後拉伸破壞的試片外觀	34
表 5.3 高溫低濕 30 天後乾燥後的電阻與 R_0 的差異	45
表 5.4 高溫低濕 30 天有無在乾燥袋中的強度差異	46
表 5.5 高溫低濕處理後的強度變化	46
表 5.6 浸泡熱水電阻前後比較	51
表 5.7 浸泡熱水不同天數後的強度變化	52
表 5.8 浸泡熱水 30 天有無後乾燥的強度差異	52
表 5.9 不同實驗處理的典型拉伸破斷外觀	55
表 5.10 S5 含碳纖維紙試片拉伸強度	72



第一章 緒論



1.1 前言

金屬結構相關的腐蝕問題和環境導致的木材劣化問題，推動了用結構聚合物複合材料完全或部分取代這些材料。與金屬結構相比，纖維強化塑膠（Fiber reinforced plastics, FRP）複合材料的優勢包括減輕重量、出色的抗腐蝕能力。因此，玻璃纖維強化塑膠（glass fiber reinforced plastics, GFRP）複合材料被用於海上石油平台[1]、石油和水管道、儲水箱、海水淡化廠、潮汐和海上風力渦輪機。[2, 3]

在基材方面，環氧樹脂由於其優越的強度、韌性和耐化學性，常被用作結構性承重 FRP 的基材[4]。然而，環境中的濕氣會使聚合物軟化，導致其機械性能下降。[2]

為了能監測在運作過程中的複合材料結構的完整性，普遍透過在關鍵負載區域表面安裝應變規，但是這容易受到外部影響，且無法感測內部應變。因此，不對 FRP 的機械性能產生負面影響的自感應材料或嵌入式應變傳感器是值得研究的。目前已有布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Gratings, FBG)、電性測量、聲頻發射、波傳播[5-7]這些關於結構健康監測的研究。[8]

對於電性量測的方式，若要應用於本身不導電的 GFRP，可以將 FRP 的基材混入碳奈米粒子，便能製造出具有導電基材的 GFRP，能感應內在應變和損傷。[8]

1.2 研究動機

GFRP 常用於高溫、高濕的惡劣環境，導致濕熱老化(hygrothermal aging)效應。現階段的偵測方式多較為費時昂貴，本研究旨在探討以較容易量測的電阻監測方式做到對 GFRP 老化或損傷評估的非破壞性檢測可行性。在 GFRP 老化過程以及後續的拉伸測試中，監測電阻與光柵頻譜的改變，試圖了解不同老化或損傷對電阻變化產生的影響。



第二章 文獻回顧



2.1 複合材料的濕熱老化機制

長期處於高濕度環境的複合材料，其基材聚合物會吸收水分。進入聚合物中的水分可分為游離水(free water)和結合水(bound water)[9-11]。游離水佔據聚合物分子網絡中的微空腔，所以不對複合材料的體積造成影響。而結合水會與聚合物分子鏈的極性段形成氫鍵結合，導致聚合物體積膨脹，進而使複合材料內部產生額外的應力。除了體積膨脹外，吸收的水分還會使基材軟化，使機械強度以及玻璃化轉變溫度降低[9-12]。在吸收的水分長期影響下，還會導致基材聚合物水解[13-15]，以及基材與纖維之間的介面弱化，原本就存在於複合材料內部的殘留應力加上體積膨脹所造成的應力，以及可能的外加工作應力，可能在弱化的介面生成介面缺陷或開裂[12, 16-21]。

至於高溫有正反兩方面的效應。長時間處於高溫會使基材降解，並產生微裂縫[22]。此外高溫還會促進擴散作用，使水分在複合材料表面更快速被吸收並往內部擴散[19, 23, 24]，加速上述水分導致的各種複合材料劣化機制的進行。另一方面，對於固化後尚未完全交聯(cross-linking)的熱固性聚合物基材，高溫可以使其近一步成化交聯，進而增加基材的強度[18, 24-26]，並導致基材體積收縮[20, 27]。

2.2 以電性監測複材老化

B. Bian, G. Xia, J. Li, S. Shao, Q. Duan 和 Q. Xie[52]製備了環氧樹脂/玻璃纖維樣品，並進行了長達 840 小時的加速熱老化試驗。在不同的老化階段，測試了樣品的表面絕緣性能、介電性能、熱性能和機械性能。結果表明閃絡電壓(flashover voltage)明顯下降。這是因為老化伴隨著淺陷阱向深陷阱的轉化和導電通道的減少，從而減慢了電荷耗散速度，降低了閃絡電壓。介電性能、熱性能和機械性能也呈惡化趨勢。研究推斷熱老化對環氧樹脂基體的破壞比對玻璃纖維的破壞更大、材料劣化的主要可能原因是玻璃纖維的脫落和基體長鏈的斷裂。

Y. Yang 等人[53]在 95%相對濕度和 95°C、85°C、75°C 溫度條件下對環氧樹脂複合絕緣材料進行了濕熱老化。測量了電氣性能，包括體積電阻率、電導率、

介電損耗和擊穿強度。發現擊穿強度在濕熱老化過程中幾乎不會發生變化。且發現介電損耗的顯著增加與根據 IEC 60216 標準所述的材料機械強度預測的壽命有很好的相關性。因此，提出了另一種壽命預測標準：當材料的介電損耗在 50 赫茲和低頻下分別達到未老化值的 3 倍和 6-8 倍時，該材料即被視為達到壽命終點。

2.3 奈米碳管複合材料

2.3.1 奈米碳管

一個單壁奈米碳管(single-walled carbon nanotube, SWCNT)可視為捲起一部份石墨烯片材實現的一個無縫圓柱體。SWCNTs 可以是金屬性、半導體性或小間隙半導體性(small-gap semiconducting)，這取決於碳管軸向的石墨烯晶格方向。[28]

而一個多壁奈米碳管(multiwalled carbon nanotube, MWCNT)是由多個捲起的石墨烯片組成，內徑最大可達數十奈米，外徑介在數奈米到數十奈米之間。由於多種同心 SWCNTs，MWCNT 的電子結構更加複雜[28]。有文獻[29, 30]認為 MWCNT 的電子傳輸與直徑較大 SWCNT 的類似，因為從外部通過 MWCNT 的電流大多被限制在最外層的圓柱。MWCNT 已被發現內在電阻(intrinsic resistance)為 0.2-0.4 kΩs/μm[31, 32]。

2.3.2 奈米碳管網路的電阻性質

在不導電的聚合物中添加導電的奈米粒子，可以誘發導電性。其導電性可以用已建立的滲透理論(percolation theory)來解釋[33]，當填料體積占比夠高，達到滲透閾值(percolation threshold)，便可形成導電通路。由於其導電性是基於導電顆粒的滲透路徑(percolated pathways)，填料的長寬比和分散性是在低填料含量下實現導電複合材料的重要因素。因此，有相對較低表面積和較高長寬比的 MWCNTs，能在較低含量下有效提高導電性。[34]

CNT 複合材料(carbon nanotube-based composite)電阻主要由兩部分主導，第一個是 CNTs 的內在電阻， R^{CNT} ，第二個是碳管之間的電阻；碳管之間的電阻又分成碳管彼此直接接觸的接觸電阻， R^{C} ，另一個是碳管之間有小間隙的透納電阻

(tunneling resistance), R^T ; 如圖 2.1。接觸電阻與接觸面積有很大的關聯，從數百到數千 $k\Omega$ s 都有可能。透納電阻可由式(2.1)表示：

$$R^T = R_0 e^{\lambda s} \quad (2.1)$$

其中，若假設小偏壓(bias voltage)，且障壁為矩形：

$$R_0 = \frac{1}{C_1} \frac{S}{\sqrt{K}} \quad (2.2)$$

$$\lambda = C_2 \sqrt{K} \quad (2.3)$$

常數 C_1 與 C_2 分別為 3.16×10^{10} 和 1.0125， K 為平均電位障(potential barrier, 單位為 eV)， S 是間隙(單位為 Å)。[28]

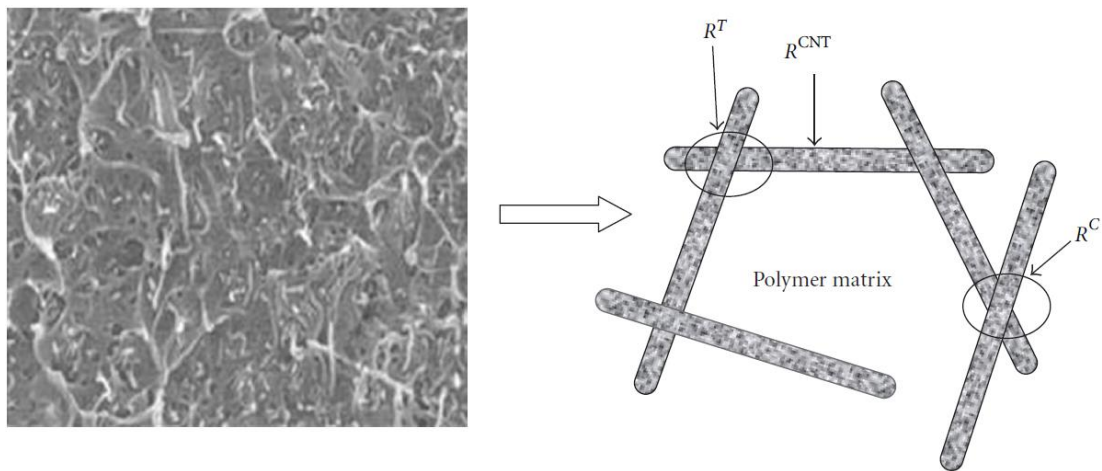


圖 2.1 聚合物基材中的 CNT 網絡圖示[28]

2.3.3 奈米碳管複合材料的壓阻效應(piezoresistance effect)

當 CNT 複合材料發生機械變形，電阻主要會因 CNTs 之間的接觸與透納距離的變動而改變，距離越遠電阻越大，此為基材中 CNT 導電網路的壓阻效應[28]。有許多研究展現了 CNT 複合材料用於感測應變的潛力[8, 35-37]。

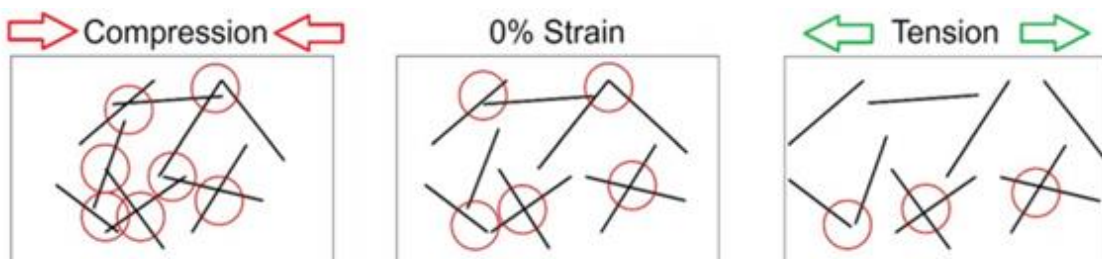


圖 2.2 CNT 複合材料壓阻效應機制示意圖[38]



2.3.4 溫度對奈米碳管複合材料電阻的影響

許多研究發現 CNT 複合材料的電阻會隨溫度提高而下降[15, 39-41]，除了 MWCNTs 本身會隨溫度上升而電阻率降低[42]，有文獻[40, 43, 44]指出其影響太小可以忽略，認為主要機制是：帶電粒子的熱活化(thermal activation)克服了 MWCNTs 之間的電位障，導致 CNT 複合材料的電阻降低。另外，溫度變化會使基材體積改變，進而影響 CNTs 之間的距離，這也是影響 CNT 複合材料的電阻的因素之一。

2.3.5 濕度對奈米碳管複合材料電阻的影響

根據文獻[45-48]，濕度影響以聚合物為基材的 CNT 複合材料的機制可歸因於三點：一，聚合物在不同濕度下吸收濕氣膨脹的程度不同，影響 CNTs 之間的距離；二，水分子和 CNT 模組(CNT modules)之間的電荷轉移以及導致 CNTs 交界處的電阻變化的費米能階(Fermi level)；三，CNTs 因吸附水分子導致內在電阻上升。對於以環氧樹脂為基材的 CNT 複合材料，主要的機制是聚合物吸水膨脹，CNTs 內在電阻變化影響太小可以忽略[49]。

2.3.6 奈米碳管應用於複合材料損傷監測

已確立層板複合材料(composite laminates)的損壞始於以基材為主導的失效模式，如基材裂開和脫層，通常在複合材料壽命的末期才發生纖維斷裂。在絕緣基材中引入 CNT 網絡，當脫層或微裂縫開始發生或擴張，CNT 網絡會部分缺失，導致電阻上升。如回顧型論文[50]所統整的，已有許多利用 CNTs 進行 FRP 損傷監測的研究。

為了評估複合材料在使用過程中的損傷的進展與識別失效階段，Thostenson 和 Chou [51]對 FRP 層板進行循環負載(cyclic loading)，發現裂縫開始於 90° 中間層，直到這些層的裂縫隨著負載增加逐漸飽和，並在裂縫表面觀察到 CNTs 被拉出，如圖 2.3。對於循環負載中電阻響應，在發生微裂縫前電阻變化遵循應變曲線，如圖 2.4。裂縫開始出現後，電阻變化偏離應變曲線，並於卸載時電阻呈現不可逆的上升。在部分單一個增加應變的過程中觀測到三階段的電阻響應：一，裂縫重新打開；二，彈性變形，沒有導致新的裂縫構成；三，新的裂縫累積；如圖 2.4(b)。

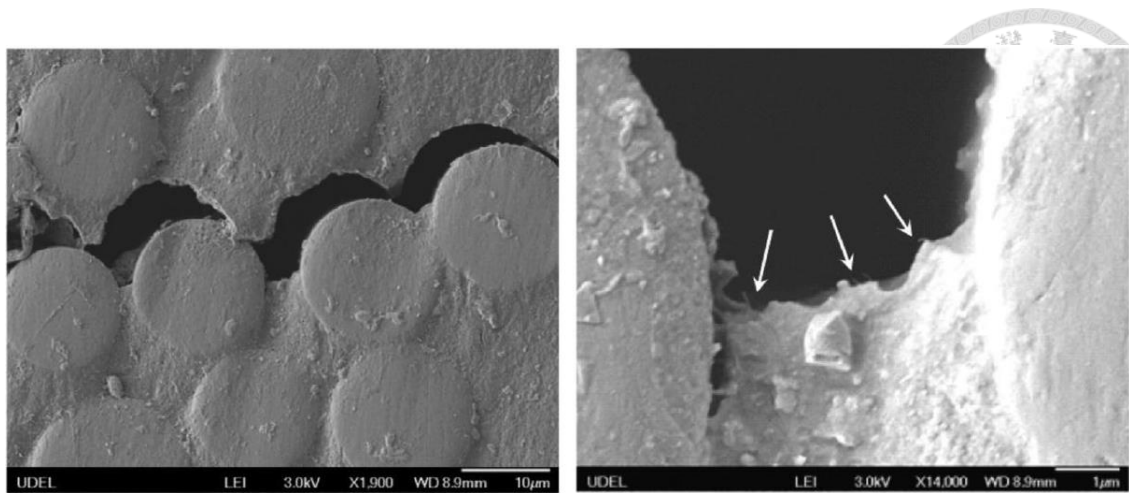


圖 2.3 SEM 圖像：(左)裂縫於 90° 疊層中；(右)環氧樹脂基材中的 CNTs[51]

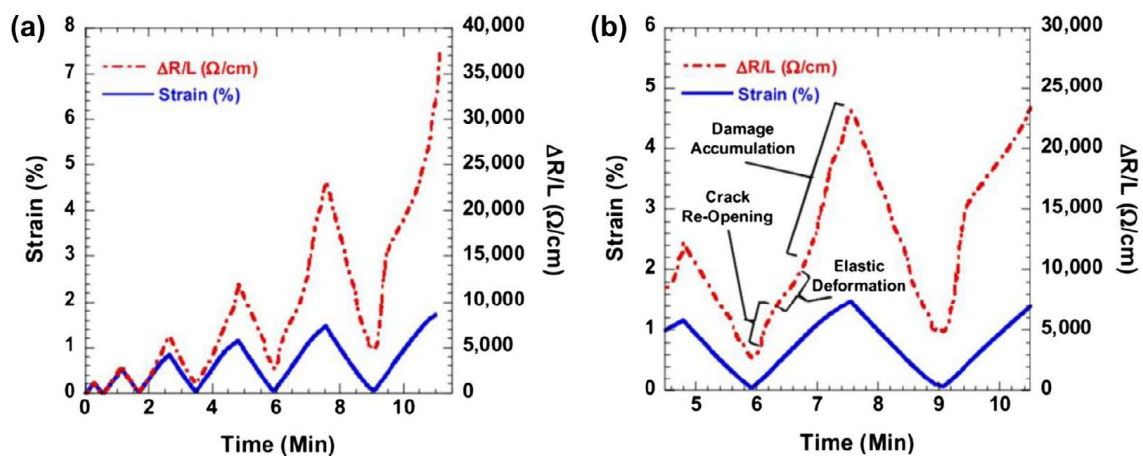


圖 2.4 在遞增循環負載下用 90° 中間疊層的交叉疊層層板複合材料的損傷產生與發展研究：(a)循環負載下的電阻響應；(b)聚焦於第五次循環的電阻響應[51]

2.4 布拉格光纖光柵

2.4.1 光纖簡介

光纖是纖維狀用於光傳輸的工具，由軸心向外可分為纖芯(core)，包層(cladding)，緩衝層(buffer)和外層護套(jacket)[54]。纖芯為圓柱狀，通常由石英玻璃製成，會參雜其他化學原料以達到所須的折射率[55]。包層由玻璃或塑膠製成，其折射率比纖芯低，通常直徑約 125 μm 。緩衝層保護光纖不受會導致散射損失(scattering loss)的微彎曲和物理損壞。

光在光纖中傳輸的原理是全反射現象。因包層的折射率較纖芯小，當纖芯內的光射到纖芯與包層的介面，且入射角大於臨界角時，入射光將全部被反射回纖核，並沿光纖傳播。臨界角與介面處兩介質的折射率有關，見式(2.4)：

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.4)$$

其中 θ_c 為臨界角， n_1 、 n_2 分別為光密介質與光疏介質的折射率。

光纖可以根據模態數分為多模光纖(Multi-mode fiber)與單模光纖(Single-mode fiber)[54, 56]：

(1) 多模光纖

多模光纖適用於短距離通信，其纖芯直徑較大，為 50-62.5 μm 。大直徑使光可以在許多不同射線路徑中通過光纖傳播，因此，檢測器會在不同的時間點接收到射線。這阻礙了數據傳輸速度與有效傳輸距離，約 200-500 公尺。

(2) 單模光纖

單模光纖較適合用於長距離通訊，其纖芯直徑為 5 到 10 μm 。由於直徑較小，只能傳播一種模態的光，如圖 2.5。儘管如此，單模光纖的頻寬仍被色散產生的脈波延散(pulse-spreading)限制了。

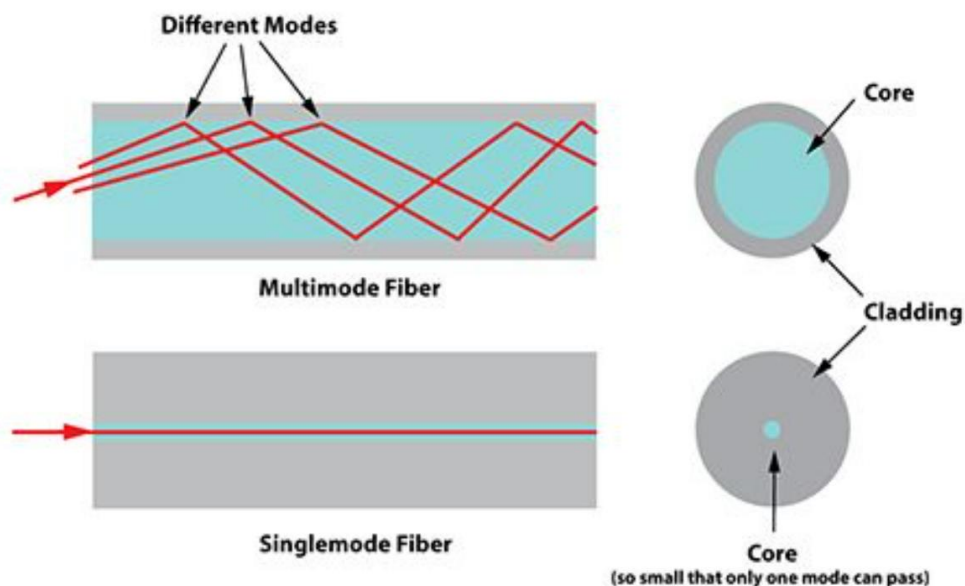


圖 2.5 多模光纖與單模光纖差異示意圖[56]

2.4.2 光通信功率單位

光通信會遇到的功率量級比較小，常用 mW 或 μW 為單位。功率損耗方面常以 dB 為單位表示，見式(2.5)：



$$L = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.5)$$

其中， L 為功率損耗，單位為 dB， P_{in} 與 P_{out} 分別為輸入與輸出的光功率。

為了能將光功率用 dB 相減來表達倍率差，因此有以 dBm 為單位表示功率的產生，其定義如式(2.6)：

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P_{mW}}{1} \quad (2.6)$$

其中， P_{dBm} 為以 dBm 為單位的功率， P_{mW} 為以 mW 為單位的功率。[57]

2.4.3 布拉格光纖光柵的原理

將紫外光照射具感光特性的光纖，會使光纖的折射率永久變化，而將一小段光纖產生週期性的折射率變化，即可在光纖上做出光柵效果，並藉此調整特定波長的傳播模態[58]。

布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Gratings, FBG)的光柵週期較小，約 $1 \mu m$ ，常見光柵長度 1-2 cm。通常單模光纖的各方向折射率可視為一樣，當寬頻光源行經 FBG，會反射以布拉格波長為中心的單峰頻譜，如圖 2.6，其中布拉格波長可以式(2.7)表示：

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2.7)$$

其中 λ_B 為布拉格波長， n 為纖芯的有效折射率， Λ 為光柵間距。[59]

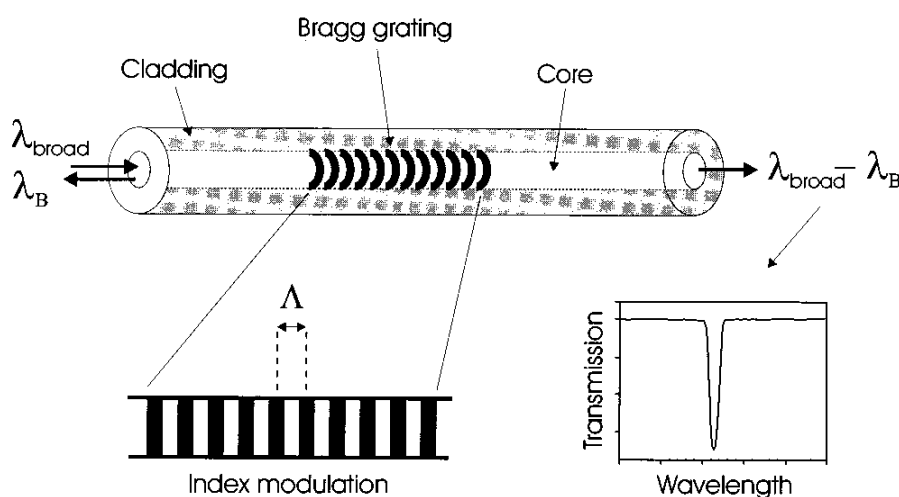


圖 2.6 寬頻光源通過布拉格光纖光柵示意圖[59]

2.4.4 布拉格光纖光柵的響應

布拉格波長會隨溫度與應變改變，如式(2.8)：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - p_e)\epsilon_z + (\zeta + \alpha)\Delta T] \quad (2.8)$$

其中 $\Delta\lambda_B$ 為布拉格波長的變化， λ_B 為原布拉格波長， ϵ_z 為光纖軸向的應變， p_e 為光彈常數， ζ 為熱光係數(thermo-optic coefficient)， α 為熱膨脹係數。典型光纖若 λ_B 為 1550 nm， ϵ_z 每上升 1 μ 反射頻譜會往長波長飄移約 1.2 pm，每上升 1 $^{\circ}$ C 反射頻譜會往長波長飄移約 13.7 pm。[60]

若有平面應力場導致的多軸向應變，反射頻譜會從單一波峰劈裂為兩個波峰，且兩波峰之間的距離與側向應力成正比[59]。

FBG 每一小段的光柵會反映該段之應變。當處於不均勻應變場時，不同段的光柵分別反射反映該段應變的各個頻譜，疊加成整體的反射頻譜[61]。

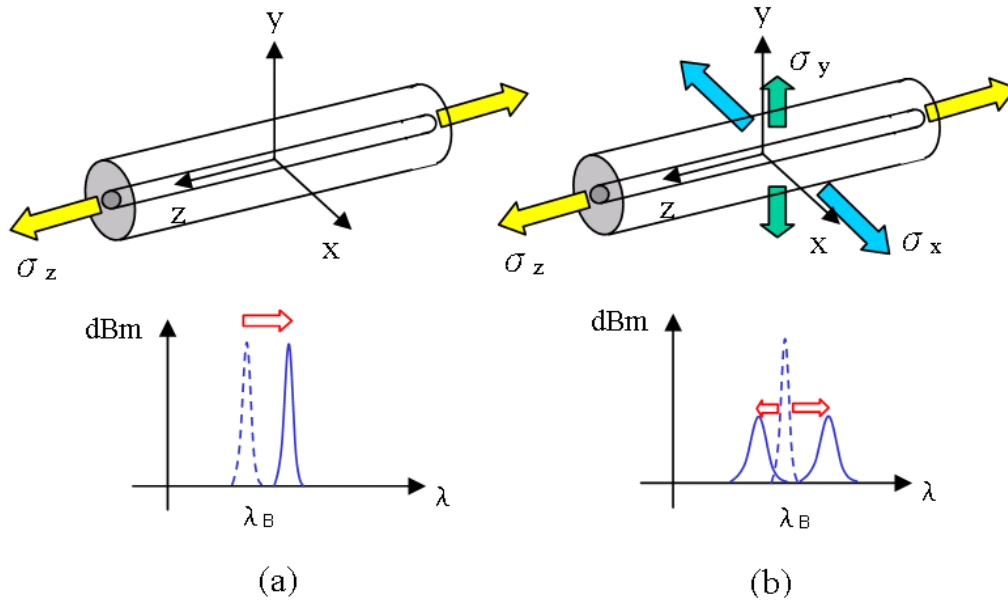


圖 2.7 FBG 在(a)單軸向 (b)多軸向 應力下的響應[61]

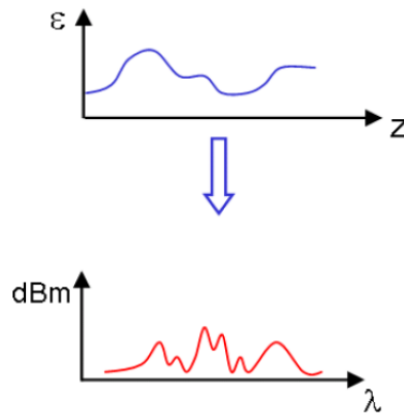


圖 2.8 FBG 在不均勻應變場下的響應[61]



2.4.5 布拉格光纖光柵的應用

FBG 具有小、輕、高耐腐蝕性，以及抗電磁場干擾的優點，已有許多將 FBG 用於複合材料結構健康檢測的研究[62-64]。

Karalekas 等人[20]將 FBG 內埋在直徑 12mm 的圓柱狀環氧樹脂裡，浸泡於 50°C 的蒸餾水中 2330 小時。其頻譜有啁啾化的現象，如圖 2.9。研究結果指出使用 FBG 傳感器可以監測環氧樹脂中濕熱老化對應變的影響，還可以獲得水分膨脹係數、熱膨脹係數、樹脂轉換率這些關於基材的參數，甚至能反映出纖維與基材界面裂紋傳播的信息。

Mieloszyk 和 Ostachowicz[65]將 FBG 黏在兩個 GFRP 之間組成試片，浸泡在 60°C 的去離子水中。研究指出水分導致的應變可由 FBG 來測量，可應用於監測膠黏劑層的浸泡和乾燥過程。

Z. Fan 等人[66] 展示了一種光柵長度不匹配傳感方法，以實時監測玻璃陶瓷結構健康的重要因素——殘餘應變，可以同時解調溫度和應變。確認了嵌入式 FBG 方法對金屬-玻璃-陶瓷電氣貫穿組件(metal-to-glass-ceramics electrical penetration assembly)在熱循環老化過程中的結構健康監測，具有良好的準確性和可靠性。

S. Mohanta, Y. Padarthy, J. Gupta 和 S. Neogi[67]使用嵌入式 FBG 監測老化過程中產生的 FRP 內部吸濕應變。通過定期進行破壞性機械測試，評估了浸泡時間內複合材料強度的降低情況，確定了性能退化的機理。同時計算了複合材料層壓板內部產生的應變。證明了應變測量是一種有效的無損技術，可用於實時估算玻纖複材層壓板的性能。

單秋成和林子傑[68]將 FBG 內埋進兩片複材單搭接的黏著劑中，研究了試片於 60°C 下濕熱老化 30 天期間的全頻譜響應發展及其隨後的拉伸和疲勞失效。發現當帶有單搭接的複合結構處於易受影響的環境中時，FBG 的啁啾狀態變化和頻譜偏離的情況可能會顯示出濕熱降解的證據。在加載到原始強度的一小部分或在疲勞壽命的一小部分循環加載後，卸載光譜中出現嚴重的啁啾，也表明發生了濕熱降解。

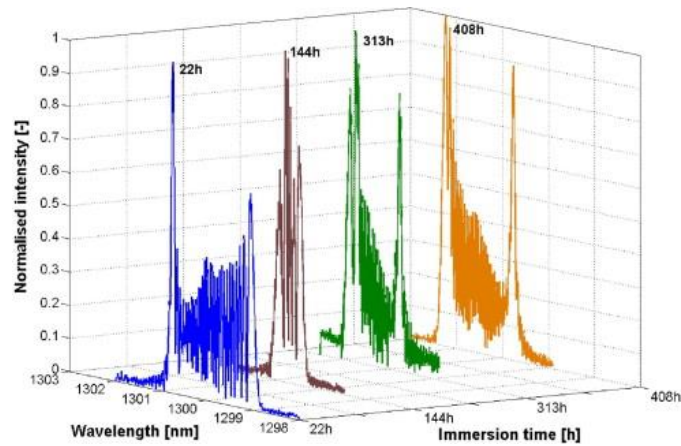


圖 2.9 FBG 吸收水分後的啁啾化現象[20]

2.5 文獻回顧總結

對於複材的濕熱老化監測，現已有研究使用介電損耗確立了監測複材濕熱老化壽命的標準。還有研究能使用嵌入式 FBG 分析材料內應變，來實時推算複材的老化性能變化，且 FBG 另有啁啾的現象可能會顯示出濕熱降解的證據。但不論是介電損耗、FBG 或是其他現有的監測方式普遍不易量測。目前甚少研究使用電阻的方式監測複材的濕熱老化。應用奈米碳管導電網路能偵測應變和複材損傷，或許能以較容易量測的電阻監測方式做到對複材老化或損傷評估的非破壞性檢測。

第三章 實驗材料與設備



3.1 試片材料

本研究試片的基材為環氧樹脂，製造商為上緯興業股份有限公司，主劑(以下簡稱：A 劑)與固化劑(以下簡稱：B 劑)型號分別為 SWANCOR 2261-A，SWANCOR 2261-BS。如圖 3.1。



圖 3.1 (左)環氧樹脂主劑；(右)環氧樹脂固化劑

本研究試片的補強材為單向玻璃纖維布。製造商為華立企業股份有限公司，型號 FCLY3GUD180。如圖 3.2。



圖 3.2 單向玻璃纖維布

本研究將多壁奈米碳管混入試片基材，製造商為展締科技股份有限公司，型號 MWCNT-NH3-STD。

本研究將雙導電銅箔膠帶埋入試片中，作為試片的電極。代理商為莆洋國際電子有限公司。銅箔基材厚度 0.025 mm，黏膠厚度 0.035 mm，黏膠面也導電。

本研究使用的 FBG 是將光敏光纖透過 1542 nm 的相位光罩製成。光敏光纖的製造商為 Fibercore 公司，型號 PS1250/1500。

本研究使用的碳纖維紙，為安能聚綠能股份有限公司製造的再生碳纖維紙，基重為 30 g/m²。如圖 3.3。



圖 3.3 碳纖維紙

本研究為試片拉伸測試中夾持所使用之墊片(tab)，為鴻泰絕緣材料股份有限公司製造的黃 FRP，再加工成長 30 mm，寬 25 mm，厚 3 mm，斜角 30°，如圖 3.7。

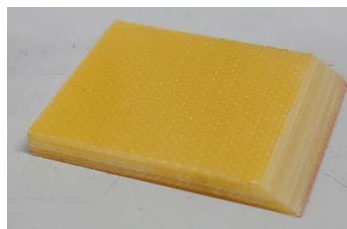


圖 3.4 墊片

本研究使用的矽膠，製造商為高菖企業股份有限公司，型號 LUSH M083。

3.2 試片製造相關設備

本研究所使用之電磁加熱攪拌器，製造商為日本的 LMS，型號 HTS-1003。

本研究所使用之超音波打碎機，製造商為 Hielscher Ultrasonics GmbH，型號 UP-200S。如圖 3.10。

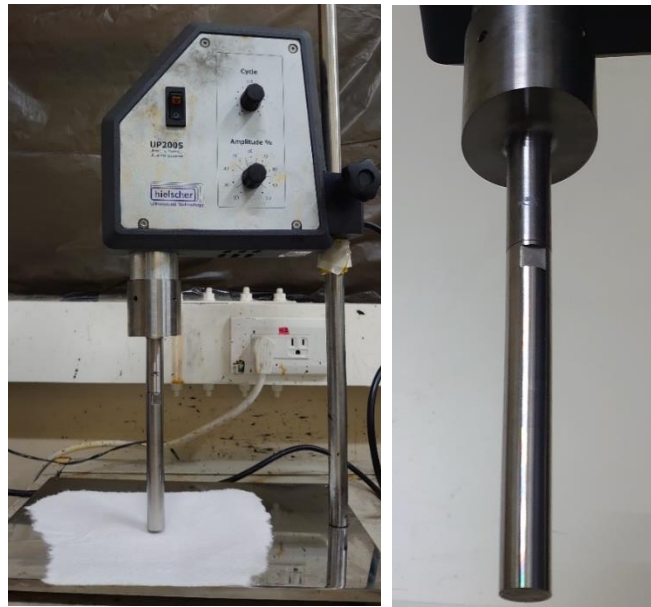


圖 3.5 超音波打碎機：(左)外觀；(右)刀頭特寫

本研究所使用之真空幫浦，製造商為洛科儀器股份有限公司，型號 Tanker230。如圖 3.11。



圖 3.6 真空幫浦

本研究所使用之樹脂攔截桶，製造商為 Airtech International, Inc.，型號 RB451。

本研究所使用之均質機，製造商為 MICCRA GmbH，型號 MICCRA D-9。搭配的刀具型號 Vario L。如圖 3.13。



圖 3.7 均質機：(左)各個零件；(右)刀頭特寫

本研究所使用之攪拌機，製造商為聲寶股份有限公司，型號 ZS-L6201L。如圖 3.14。



圖 3.8 攪拌機

本研究所使用之烘箱，製造商為登盈儀器有限公司，型號 DOS-45。

本研究所使用之鑽石砂輪切割片，製造商為嘉寶自然工業股份有限公司，規格為 SDC140R100BCW1A1R6。

本研究所使用之鑽石砂輪切割機，製造商為建德工業股份有限公司，型號 KCF-52AHD。搭載鑽石砂輪切割片。

本研究所使用之光纖切割機，廠牌為日本的 FURUKAWA，型號 FITEL S324。如圖 3.18。

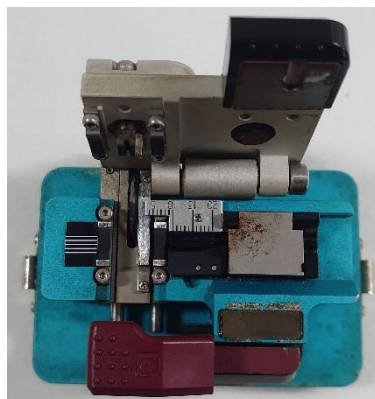


圖 3.9 光纖切割機

本研究所使用之光纖熔接機，廠牌為日本的 FURUKAWA，型號 FITELNINJA NJ001。如圖 3.19。



圖 3.10 光纖熔接機

3.3 試驗與量測設備

本研究所使用之萬能材料試驗機(Material Testing System, MTS)，代理商為國科企業有限公司，型號 MTS-810。可進行破壞力學、張力、疲勞破壞等實驗。如圖 3.20。



圖 3.11 萬能材料試驗機

本研究所使用之恆溫恆濕箱，製造商為天宜科技股份有限公司，型號 TTH-B1T-S。如圖 3.21。



圖 3.12 恆溫恆濕箱

本研究所使用之恆溫水槽，製造商為 Firstek Scientific Co., Ltd，型號 B401。如圖 3.22。



圖 3.13 恆溫水槽

本研究所使用之乾燥箱，為聯府塑膠股份有限公司生產的防潮箱，編號 KT-55，並放入乾燥劑。

本研究所使用之光頻譜分析儀(Optical Spectrum Analyzer, OSA)，製造商為安立知股份有限公司，型號 MS9710C。如圖 3.24。



圖 3.14 光頻譜分析儀

本研究所使用之寬頻光源，製造商為任世達安控光電有限公司，型號 ASE-2200。如圖 3.25。



圖 3.15 寬頻光源

本研究所使用之電源電錶，製造商為美商 Keithley 儀器公司，型號 2450 SourceMeter。如圖 3.26。



圖 3.16 電源電錶

本研究所使用之資料擷取設備，為美商國家儀器(National Instruments, NI)所生產的多功能 I/O 介面卡，型號 USB-6215。如圖 3.27。



圖 3.17 資料擷取設備

本研究所使用之溫溼度計，為 COMET 廠牌的迷你機械式立掛溫濕度計，型號 WS-A7。如圖 3.28。



圖 3.18 溫溼度計

本研究使用之電子顯微鏡，為國立臺灣大學貴重儀器中心理學院思亮館之桌上型掃描式電子顯微鏡(Hitachi TM3000)。

第四章 實驗方法與流程



4.1 試片製作方法

4.1.1 真空輔助樹脂轉注布置

1. 在製作試片之前，先將光纖不會埋入玻璃纖維布的部分用矽膠包覆，以保護光纖。如圖 4.1。
2. 在銅箔預計延伸出玻璃纖維布的部分貼上隱形膠帶。以避免樹脂附著在銅箔上影響焊接。
3. 將玻璃纖維布與要內埋的碳纖維紙、銅箔、光纖按疊層結構堆放於鐵氟龍布上。在鐵氟龍布外圍黏一圈真空膠，擺上抽氣管路，抽氣管路末端以真空膠與蛇管相接。如圖 4.2。
4. 抽氣管路接到樹脂攔截桶，再接到真空幫浦。
5. 鋪上離模布，用感壓膠帶黏住。再鋪上導流網。並將蛇管與塑膠管用真空膠相接作為進樹脂管路，置於導流網上。如圖 4.3。
6. 鋪上真空膜。如圖 4.4。



圖 4.1 用矽膠包覆光纖

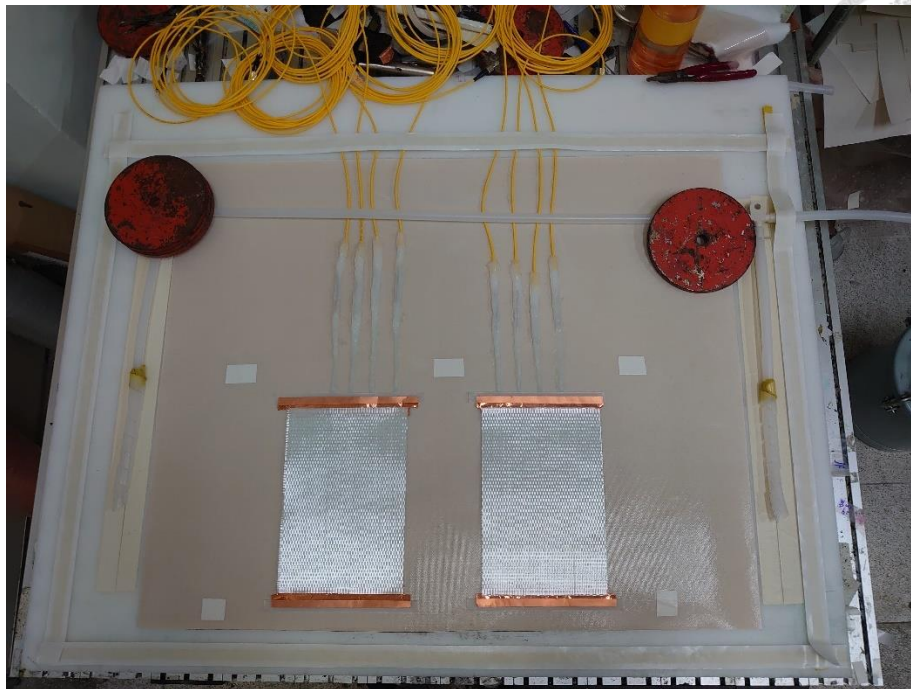


圖 4.2 織布、內埋物與抽氣管路擺放

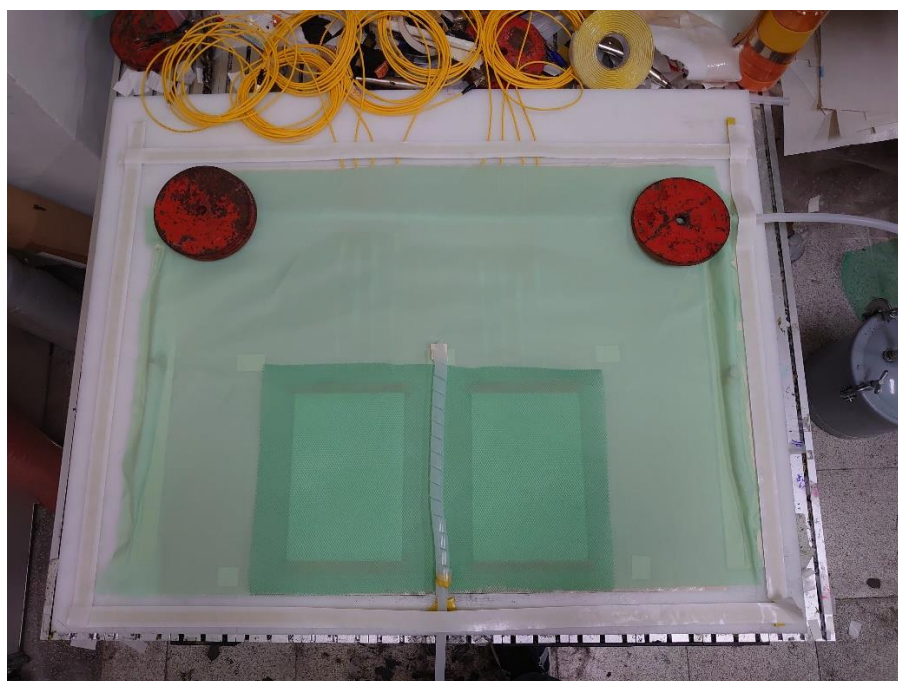


圖 4.3 離模布、導流網、進樹脂管路擺放

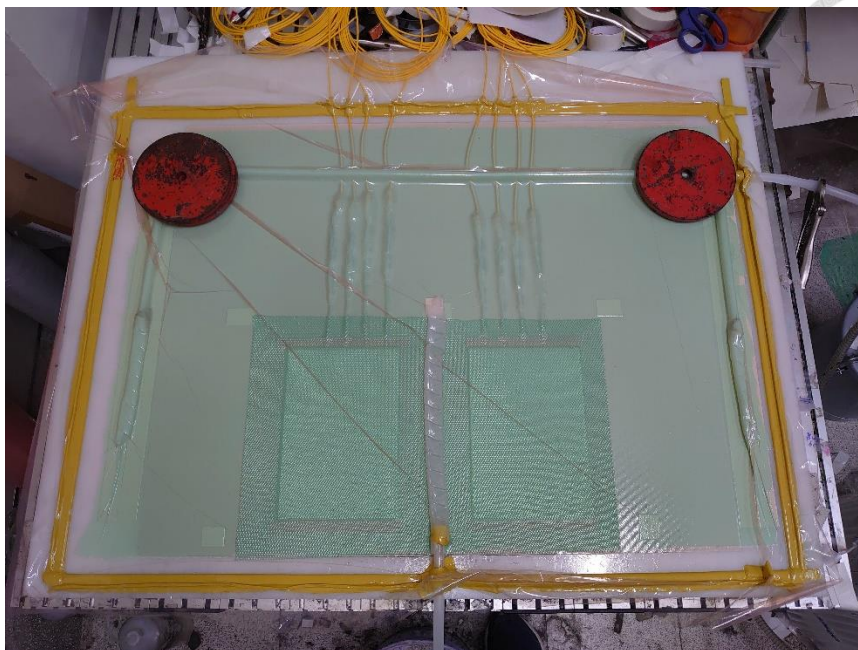


圖 4.4 轉注布置完成並抽真空

4.1.2 混和樹脂與奈米碳管

1. 將 420 ml 之 A 劑以電磁加熱攪拌器加熱並攪拌 5 分鐘。使其降低黏度。
電磁加熱攪拌器運作參數為 heat: 4、stirrer: 3。
2. 依該批次目標樹脂溶液的 CNT 重量百分濃度而定，將定量之 CNT 倒入 A 劑，以玻棒攪拌。
3. 將混和 CNT 的 A 劑以超音波打碎機打散叢聚之 CNT，5 分鐘。運作參數為 Amplitude: 50、Cycle: 1。
4. 真空脫泡至無大氣泡。
5. 以均質機攪拌 18 分鐘。轉速為 21000 rpm。
6. 真空脫泡至無大氣泡。
7. 隔水冷卻至 20°C。以防在加入 B 劑後脫泡前就開始成化反應。
8. 以 A 劑：B 劑 = 100 : 25 之比例加入 B 劑，並以攪拌機混勻。運作檔速為最低。
9. 真空脫泡盡可能去除樹脂內部氣體。約 1 小時。

4.1.3 固化及後續配置準備

1. 轉注完成後，在常溫靜置超過 16 小時完成常溫固化。



2. 以 100°C 烘烤 2 小時，完成後固化處理。
3. 以鑽石砂輪切割機切割成寬 25 mm。
4. 在延伸出試片的銅箔焊上電線。
5. 以矽膠包覆銅箔。目的是保護銅箔、增加量測的穩定性，以及在濕熱老化實驗中，避免水分從銅箔與試片主體的交界處直接滲入。
6. 將光纖被去除保護套的部分與試片主體伸出光纖端黏在基板上。以確保光纖光路穩定且不被破壞。如圖 4.5。

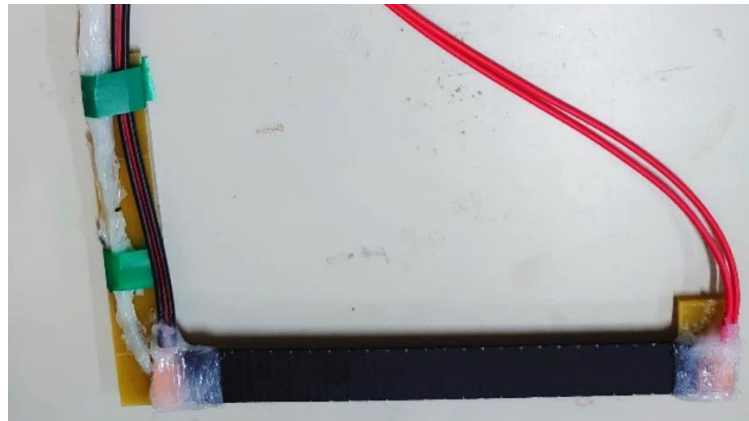


圖 4.5 準備完成的試片

4.2 試片的材料參數

本研究所有試片尺寸符合 ASTM-D3039 規範。玻纖複材試片主體的尺寸皆為長 225 mm，寬 25 mm。奈米碳管占整體樹脂溶液的重量百分濃度 0.3%。不再提高濃度是因為溶液會變更濃稠，難以掌控試片品質。為加速老化實驗，所有試片玻璃纖維疊層僅 6 層，為[0/90/90/90/90/0]。內埋結構方面分為一般試片與內埋碳纖維紙的試片 2 種。

一般試片的疊層為[0/90/光纖/90/銅箔/90/90/0]。光纖伸入玻璃纖維布 150 mm，光柵位在距離伸入端 90-110 mm 處。銅箔伸入玻璃纖維布 10 mm。

內埋碳纖維紙試片的疊層為[0/碳纖維紙/90/銅箔/90/碳纖維紙/90/90/碳纖維紙/0]。銅箔伸入玻璃纖維布 10 mm。

4.3 頻譜光路

本研究量測 FBG 的頻譜，皆為透過寬頻光源輸出光線，射入光循環器埠 1，由埠 2 接到 FBG 並將反射頻譜傳到埠 3，再接到光頻譜分析儀所得的反射頻譜。



4.4 實驗存放處理

4.4.1 浸泡熱水處理

為進行濕熱老化的實驗，使用循環式恆溫水槽，溫度選用大多數濕熱老化探討所採的 60°C 。將自來水溫度恆定於 60°C ，並將試片完全浸入水中。

不採用恆溫恆濕箱是為了加速水分滲入試片。

4.4.2 乾燥處理

試片的乾燥處理一種是存放於乾燥箱。為去除試片量測時拿離乾燥箱的濕度變化，另一種是連同乾燥劑存放於密封袋，牽出線路並盡可能堵住縫隙，再存放於乾燥箱中(下文簡稱為乾燥袋，如圖 4.6)。溫度保持室溫(Room Temperature, RT)，相對溼度(Relative Humidity, RH)為 0-30%。



圖 4.6 試片存放於乾燥袋



4.4.3 高溫低濕處理

使用恆溫恆濕箱，溫度同浸泡熱水處理 60°C ，RH 為 30%。高溫低濕處理有 2 種，一種是試片直接放置於恆溫恆濕箱腔室。為盡可能降低濕度的影響，另一種是試片存放於乾燥袋中，再連同乾燥袋一同存放於恆溫恆濕箱。

4.4.4 實驗存放處理期間電阻量測方式

在實驗存放處理期間，電阻是透過給定 5V 的電壓，量測 30 秒，取 20-30 秒的平均而得。

4.5 拉伸測試

拉伸前使用瞬間膠將加工完有斜角的墊片黏到試片上。為了避免夾持改變試片本體與作為電極的銅箔的緊密程度，進而成為一個不同實驗處理後的變因，因此將墊片黏貼的位置遠離銅箔 5 mm 以上。

為了得到試片的強度資訊，以及嘗試監測試片在不同拉伸負載後破損情形，先加載至 50 N 與 500 N 後，每一輪依電壓或頻譜的變化程度提高負載 500 N 或 1000 N，便卸載回 500 N 與 50 N，直到試片拉伸破壞。卸載回 500 N 有助於打開裂縫，偵測損傷。監測整個過程的電阻變化，以及每一輪的最大負載下、回 500 N、50 N 的頻譜。

在拉伸期間，為了能用同一台資料擷取設備同時量測到實時負載與電阻，試片是以給定電流的方式得到電壓資訊，再回推得電阻值，而設定的電流選用加載前試片電壓為 5V 時對應到的電流值。

4.6 試片與實驗處理代號

本研究每個試片皆有獨自的代號，型式為 S□N□。S 代表批次編號，同一批次為同一次混樹脂灌注製造而成的試片。N 為在該批次試片中的序列號。

為了在看圖表時能迅速得知該試片的實驗處理，在圖表上方附上試片代號，並在其後照時間順序接著實驗處理代號與該實驗處理的天數。不同實驗處理的代號如表 4.1。

表 4.1 實驗處理代號對照表

實驗處理	代號
試片後固化後，為後續實驗做配置準備的期間，存放於實驗室環境。 (Prepare)	P
乾燥處理。存放於乾燥箱。(Dry Cabinet)	DC
乾燥處理。存放於乾燥袋。(Dry Bag)	DB
高溫低濕。存放於恆溫恆濕箱。(Heat)	H
高溫低濕。在乾燥袋裡，連同乾燥袋一起存放於恆溫恆濕箱。 (Heat in Dry Bag)	HD
浸泡熱水。(Immersion)	I
高溫低濕或浸泡熱水後，再乾燥。存放於乾燥箱。	pDC
高溫低濕或浸泡熱水後，再乾燥。存放於乾燥袋。	pDB

4.7 實驗架構

本研究分為四部分。第一部分為樹脂固化的頻譜變化，第二部分為探討濕氣的影響，第三部分是老化監測，第四部分是探討試片內埋碳纖維紙對電阻監測的幫助。

4.7.1 樹脂固化的頻譜變化

為了解樹脂固化對頻譜的影響，在一般試片製造期間量測 FBG 在內埋於疊層前、樹脂常溫固化後、後固化程序剛升溫至 100°C 時、烘烤過程、烘烤 2 小時後、完成後固化程序回到室溫的頻譜。

4.7.2 探討濕氣影響

為探討環境濕氣以及不同乾燥環境對一般試片的影響，將同一批試片分成 4 組。分別是製造準備完成後即刻拉伸、存放於實驗室環境、存放於乾燥箱、存放於乾燥袋。在存放期間監測其頻譜與電阻變化，最後進行拉伸測試進行比較。

4.7.3 老化監測

在老化監測實驗部分，為了解濕熱老化的影響、濕熱老化中單純長時間高溫造成的影響、濕熱老化後可回復的程度，將試片分別進行乾燥、高溫低濕、浸泡熱水、浸泡熱水後乾燥這些不同的實驗處理，並進行拉伸測試，監測期間頻譜與電阻的變化，並觀察破斷面。

實驗處理天數分為：等到試片電阻穩定的長天期，75 天；中等天期，30 天；以及浸泡熱水試片劇烈變化階段結束的短天期，4 天。

為了確保各試片老化實驗處理前後的一致性，除了第一批以外皆經過乾燥後才開始老化實驗處理。為方便了解試片的電阻變化，皆以開始老化實驗處理前室溫時的電阻作為基準 R_0 。

其中浸泡熱水期間的頻譜是試片處在熱水中量測的。電阻則是將試片拿離水面後，擦乾，再放入烘箱 60°C 烘烤 10 分鐘才進行量測。為了確認試片 10 分鐘即可達穩定溫度，S2N4 泡熱水 75 天量測完電阻後，拿離烘箱於第 7、10 分鐘量測頻譜，兩頻譜幾乎一致，如圖 4.7，表示縱使是吸飽水份的試片，遭遇室溫到 60°C 環境溫差變化，也不需要 10 分鐘即可達溫度穩定。

僅乾燥處理組的試片資料皆置於附錄。各實驗處理所對應的試片可以對照表 4.2。

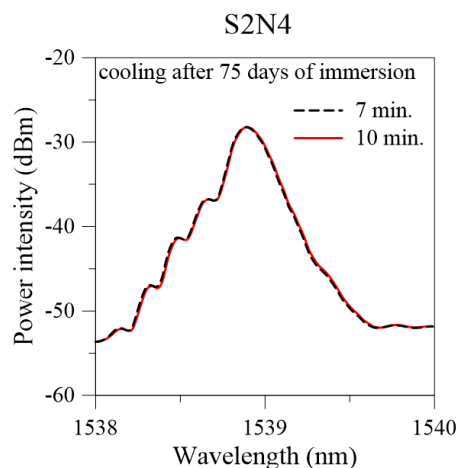


圖 4.7 S2N4 浸泡熱水 75 天後，從 60°C 降溫至室溫不須 10 分鐘

表 4.2 各實驗處理所對應的試片

實驗處理	批次	試片代號	有無後乾燥	備註
僅乾燥處理	S1	S1N3、S1N6		
	S2	S2N2、S2N7		
	S3	S3N3、S3N6		
	S7	S7N2、S7N7		
高溫低濕4天	S7	S7N1、S7N8	無	
高溫低濕30天	S1	S1N2、S1N7	有	未事先乾燥處理
	S3	S3N1、S3N7	有	保持在乾燥袋中，直到拉伸
	S8	S8N2、S8N7	有	
		S8N1、S8N8	有	保持在乾燥袋中，直到拉伸
高溫低濕75天	S2	S2N1、S2N6	無	
浸泡熱水4天	S7	S7N4、S7N6	無	
		S7N3、S7N5	有	
浸泡熱水30天	S1	S1N4、S1N5	無	未事先乾燥處理
		S1N1、S1N8	有	
	S2	S2N3、S2N5	有	
		S2N4、S2N6	有	
	S3	S3N4、S3N5	無	
		S3N2、S3N8	有	
	S8	S8N3、S8N6	無	
		S8N4、S8N5	有	
浸泡熱水75天	S2	S2N4、S2N8	無	

4.7.4 內埋碳纖維紙對電阻監測的幫助

同一批內埋碳纖維紙的試片，先將其中一片進行拉伸側測試確認其特性，其他片進行與一般試片的老化監測相仿的實驗：乾燥後分別進行繼續乾燥、高溫低濕 30 天、浸泡熱水 30 天這些不同的實驗處理，並進行拉伸測試。比較內埋碳纖維紙的試片與一般試片的電阻變化，以了解試片內埋碳纖維紙對電阻監測的效果。



第五章 實驗結果與討論



5.1 固化導致的頻譜變化

在試片製造期間量測內埋 FBG 的反射頻譜可以幫助了解樹脂成化如何影響頻譜，圖 5.1 為典型的試片在固化期間的頻譜變化，其餘試片至於附錄。在轉注完成經過常溫存放 16 小時第一階段固化後，頻譜僅是些微的往短波常飄移，約 70 pm，但經過 100°C 烘烤 2 小時後固化後，頻譜明顯地往短波長飄移超過 1 nm，並劈裂，如圖 5.1(左)。然而，在後固化階段，100°C 烘烤 2 小時期間，頻譜也僅是些微的往短波常飄移 130 pm，如圖 5.1(右)。

在固化過程中，環氧樹脂從黏稠的液態逐漸轉變為固態，並體積收縮，為頻譜往短波長飄移的可能原因。另外，後固化後的頻譜劈裂表示冷卻收縮形成了不均勻的應變場。

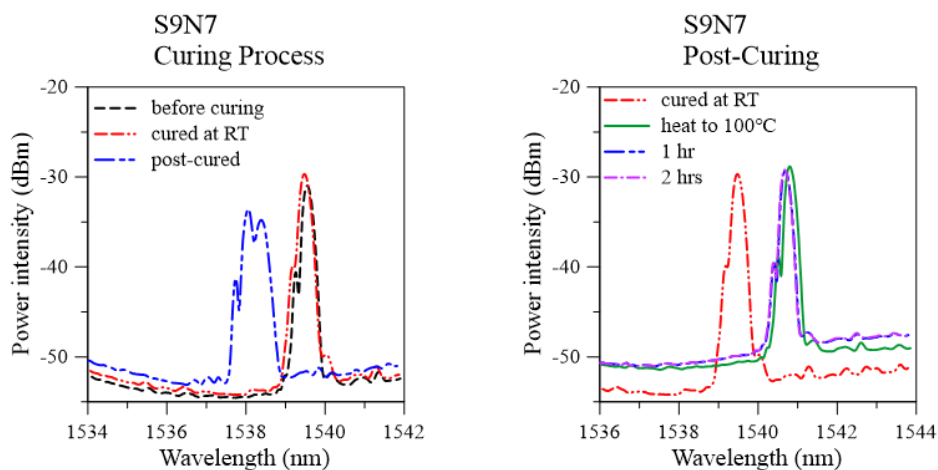


圖 5.1 S9N7 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化

5.2 濕氣的影響

5.2.1 存放期間

在存放於實驗室環境期間，頻譜逐漸往長波長飄移，但飄移速率逐漸趨緩，且劈裂逐漸消失。以 S9N7 為例，6 天飄移了約 200 pm，29 天飄移了約 540 pm，如圖 5.2。電阻也是持續但趨緩的上升，6 天上升了約 2%，29 天上升了約 5%，如圖 5.3。

存放於乾燥箱的組別，頻譜僅是往短波長飄移一點點，S9N1 在 6 天期間飄移了 100 pm，之後幾乎不變，電阻則是下降約 1%，如圖 5.4。為去除試片準備期間吸收的水分所導致的變化。

存放於乾燥袋的組別類似於存放於乾燥箱的，S9N3 頻譜 6 天往短波長飄移了 120 pm 後維持不變，但電阻有更明顯的下降，降約 2%，如圖 5.5。

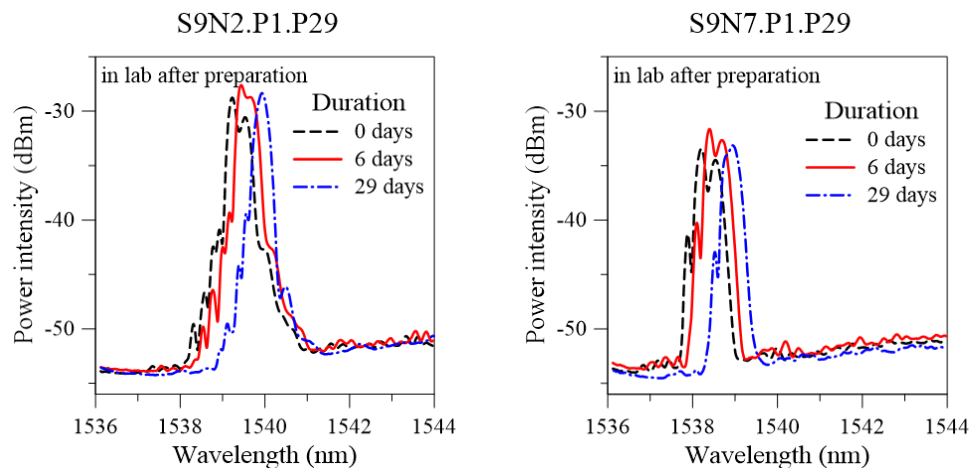


圖 5.2 S9 存放於實驗室組，存放期間頻譜變化：(左)S9N2；(右)S9N7

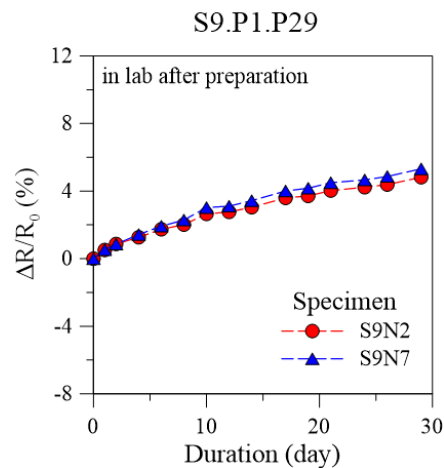


圖 5.3 S9 存放於實驗室組，存放期間頻譜變化

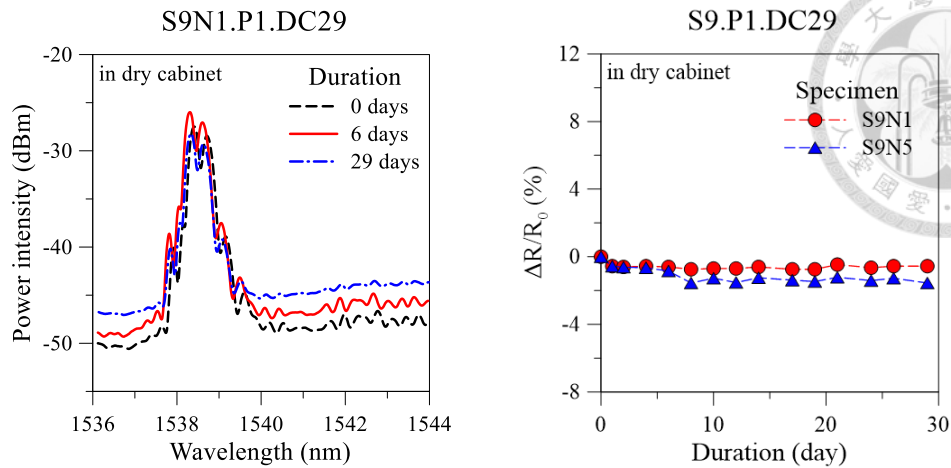


圖 5.4 S9 存放於乾燥箱組，存放期間 (左)頻譜變化 (右)電阻變化

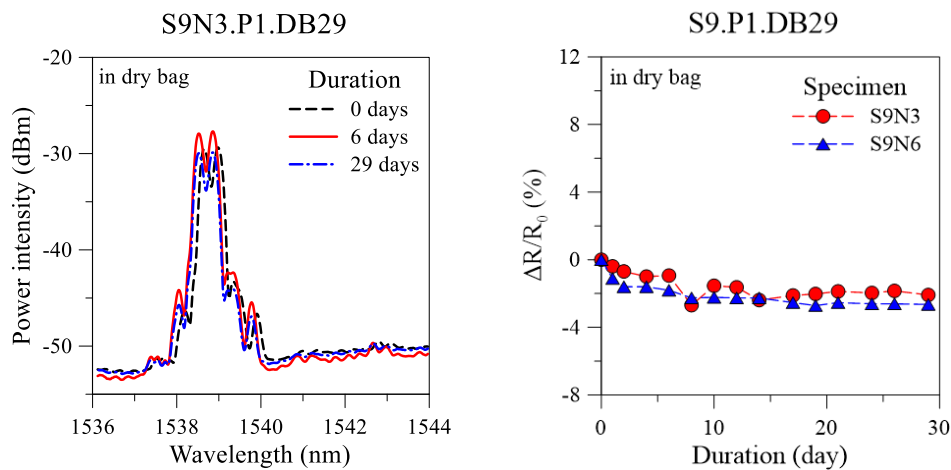


圖 5.5 S9 存放於乾燥袋組，存放期間 (左)頻譜變化 (右)電阻變化

5.2.2 拉伸測試

表 5.1 為 S9 不同試片的強度。在不同的濕度環境存放 29 天幾乎不影響強度，宏觀的斷裂外觀也無明顯區別，如表 5.2。循環拉伸期間的頻譜隨負載上升逐漸變形，2000 N 明顯劈裂，且卸載至 500 N 後劈裂仍存在，如圖 5.6 至圖 5.10。

然而在加載期間的電阻變化，存放於實驗室的試片明顯上升量較小，以從 0 N 加載至 6500 N 的循環為例，存放於實驗室的試片電阻上升量約 4%，但其他試片上升量皆超過 6%。存放於實驗室的試片卸載回 500 N 與 50 N 的電阻變化也明顯較其他試片一致，如圖 5.13 與圖 5.14。

表 5.1 S9 存放於不同環境後的試片強度

實驗類別	試片	個別強度(N)	平均強度(N)	變異係數(%)	與即刻拉伸差異(%)
即刻拉伸	S9N4	7508	7599	1.19	
	S9N8	7689			
實驗室29天	S9N2	7811	7815	0.04	2.84
	S9N7	7818			
乾燥箱29天	S9N5	7504	7504	0	-1.25
乾燥袋29天	S9N3	8005	7754	3.23	2.05
	S9N6	7504			

表 5.2 S9 存放於不同環境後拉伸破壞的試片外觀

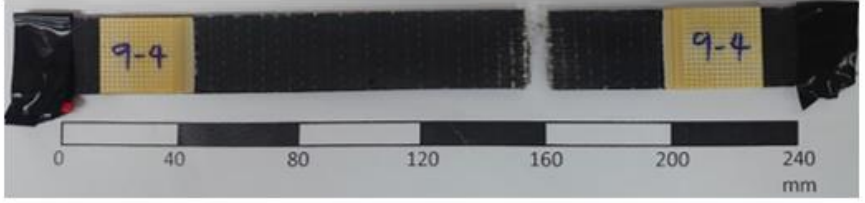
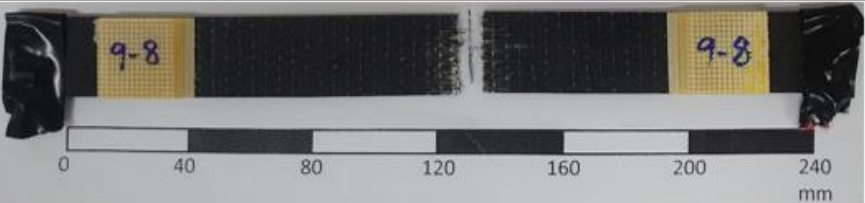
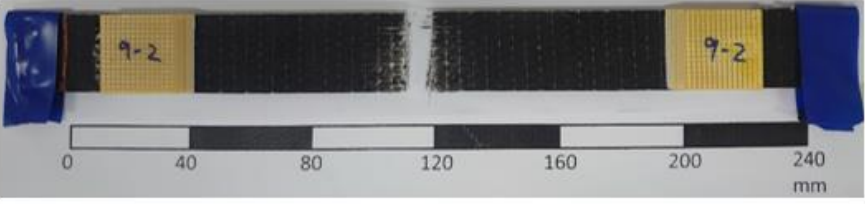
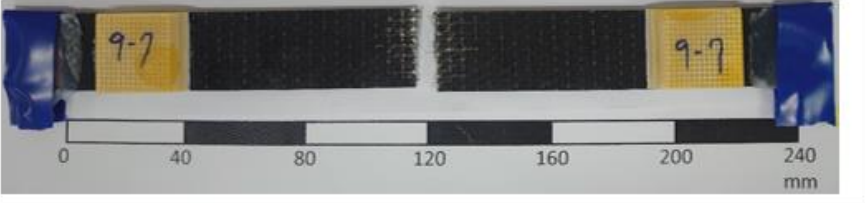
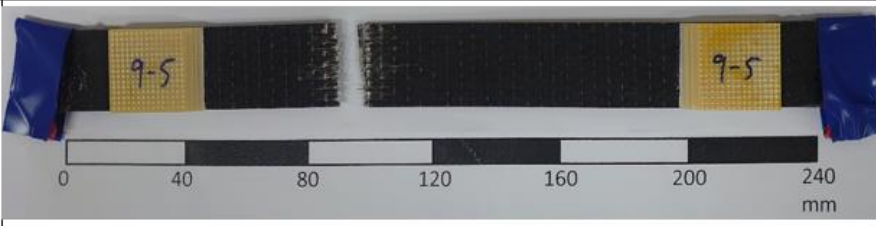
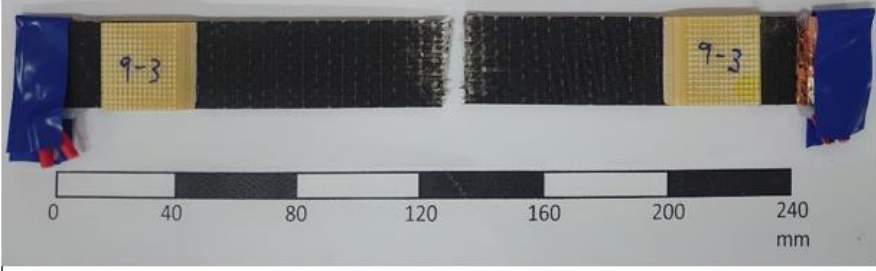
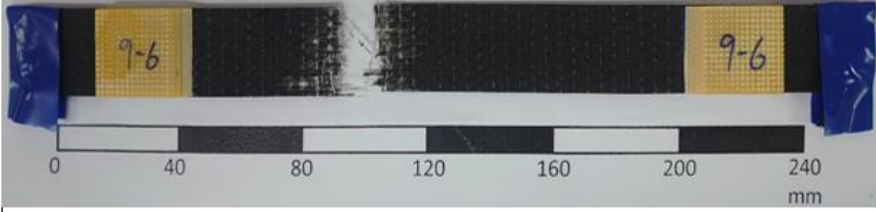
實驗類別	試片	拉伸破壞照
即刻拉伸	S9N4	
	S9N8	
實驗室29天	S9N2	
	S9N7	

表 5.2 (續)

乾燥箱29天	S9N5	
乾燥袋29天	S9N3	
	S9N6	

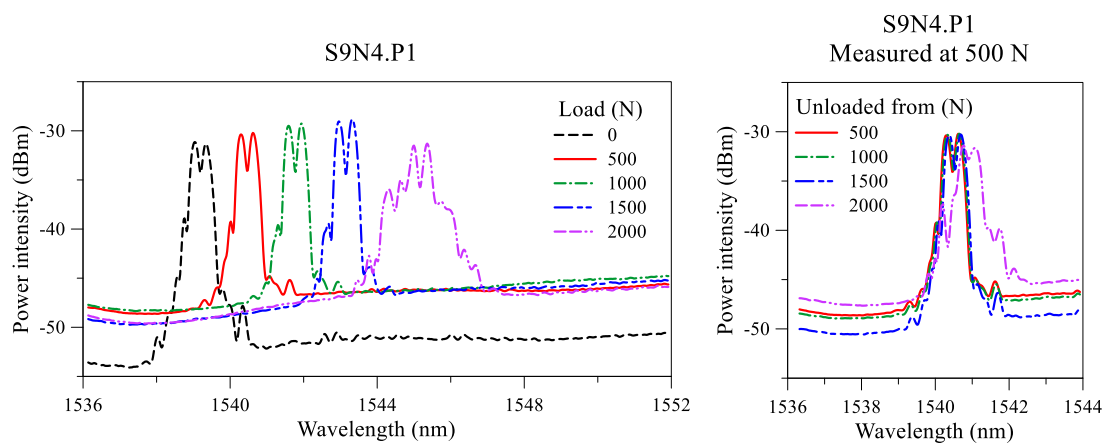


圖 5.6 S9N4 即刻拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

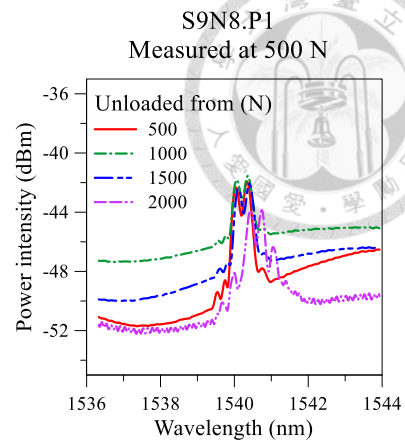
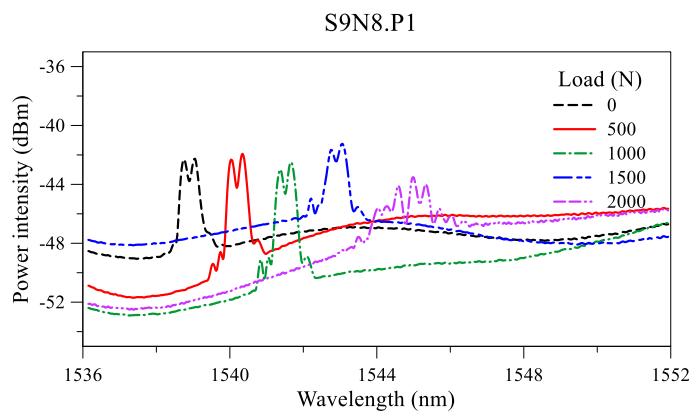


圖 5.7 S9N8 即刻拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

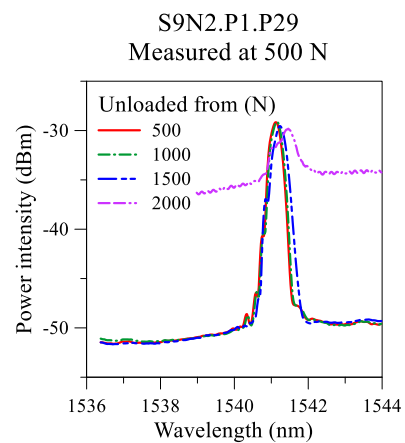
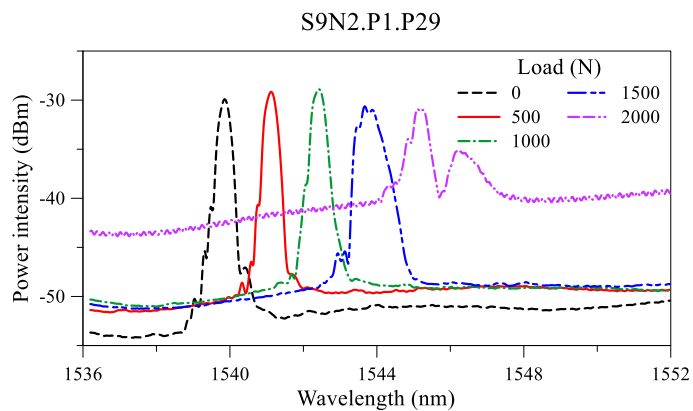


圖 5.8 S9N2 於實驗室 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

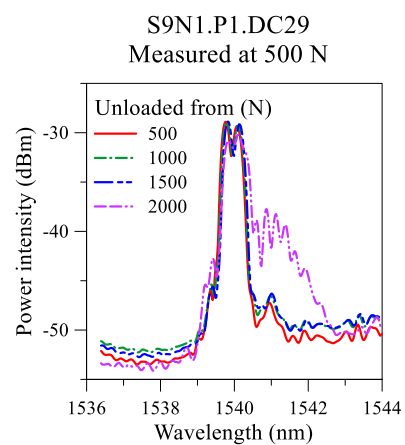
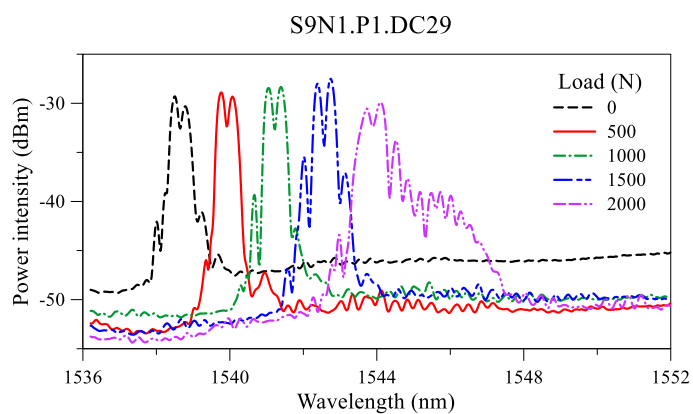


圖 5.9 S9N1 於乾燥箱 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

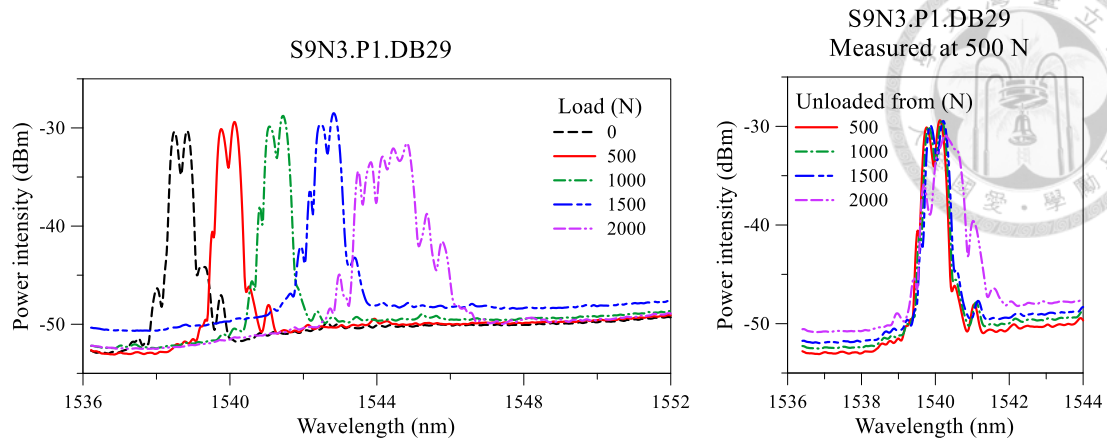


圖 5.10 S9N3 於乾燥袋 29 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

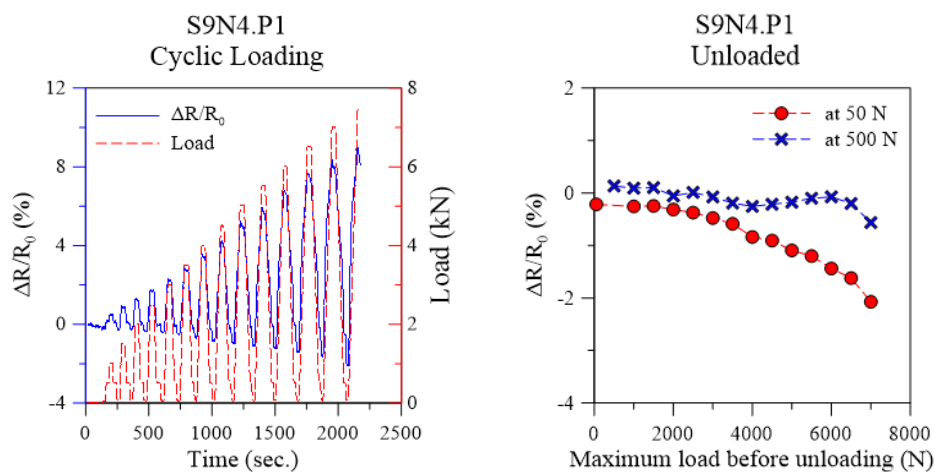


圖 5.11 S9N4 即刻拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

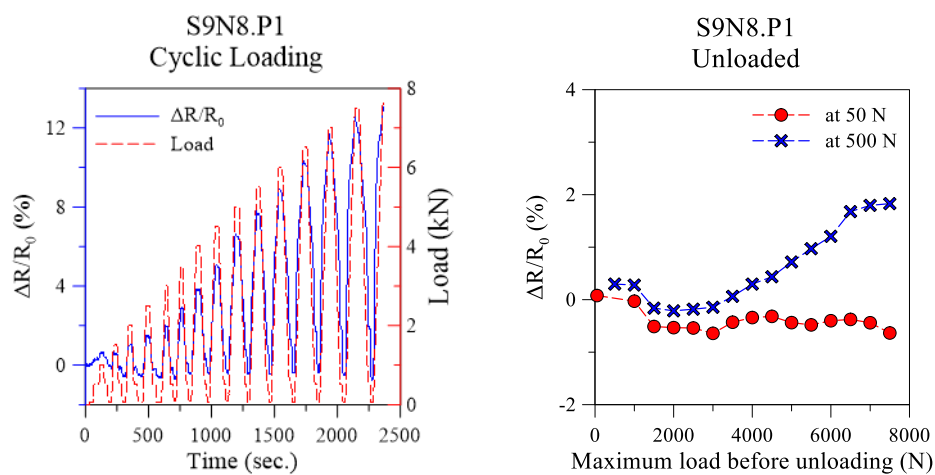


圖 5.12 S9N8 即刻拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

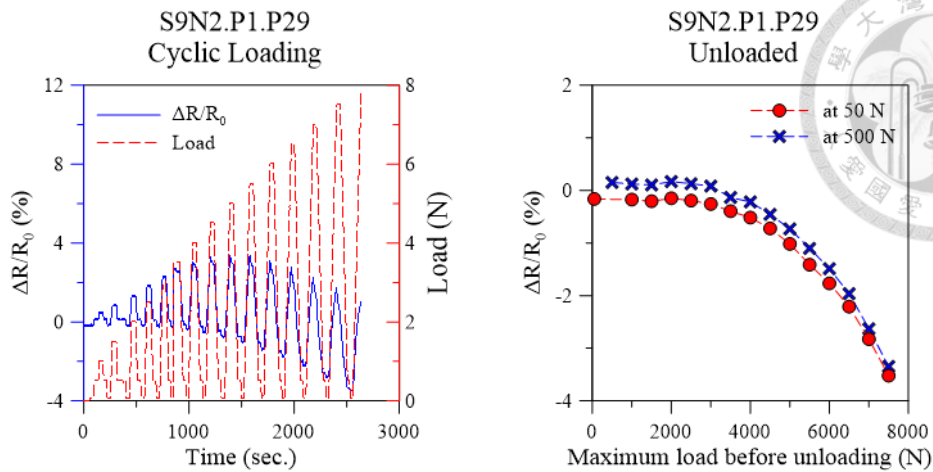


圖 5.13 S9N2 於實驗室環境 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

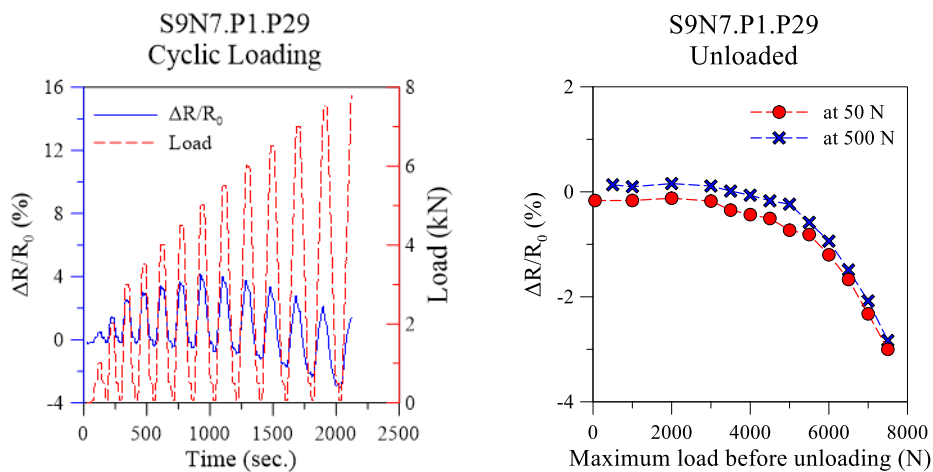


圖 5.14 S9N7 於實驗室環境 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

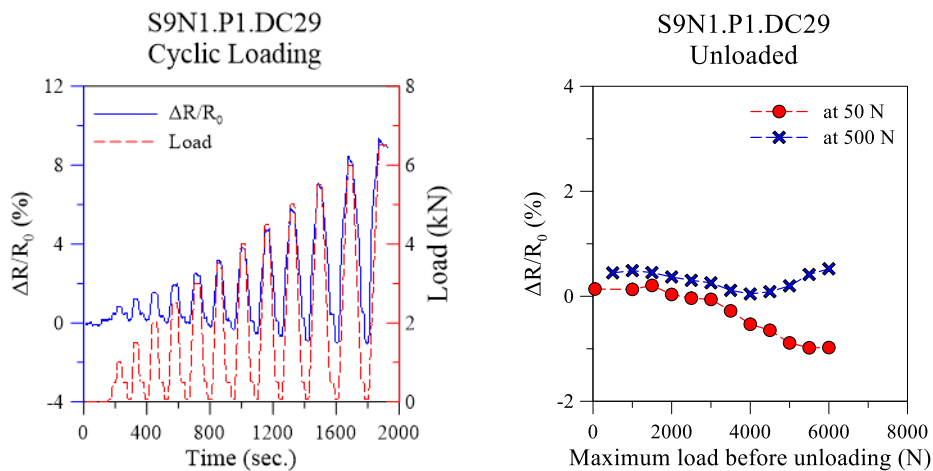


圖 5.15 S9N1 於乾燥箱 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

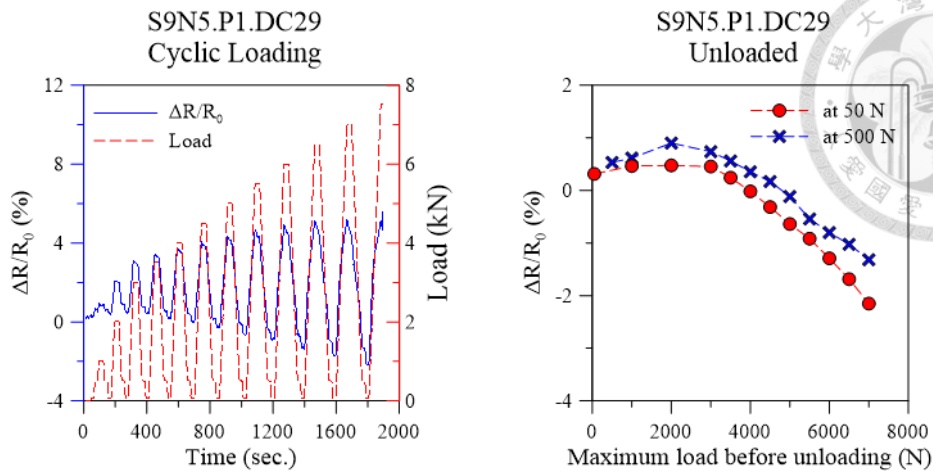


圖 5.16 S9N5 於乾燥箱 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

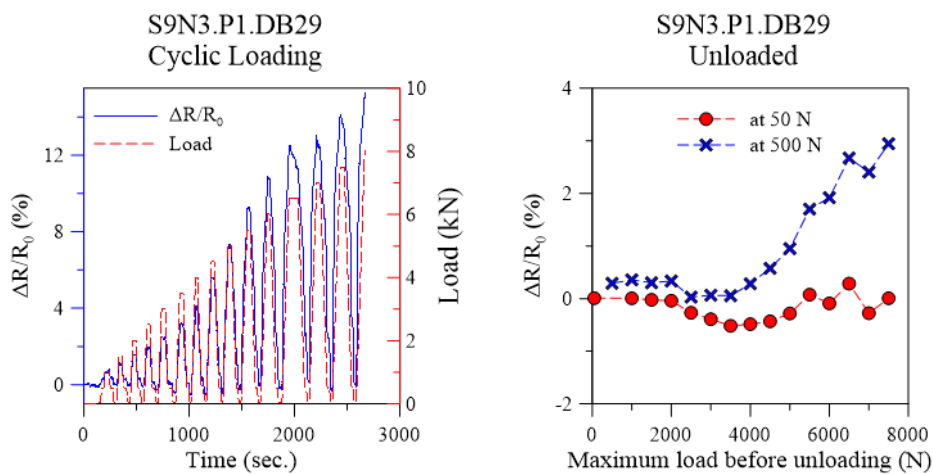


圖 5.17 S9N3 於乾燥袋 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

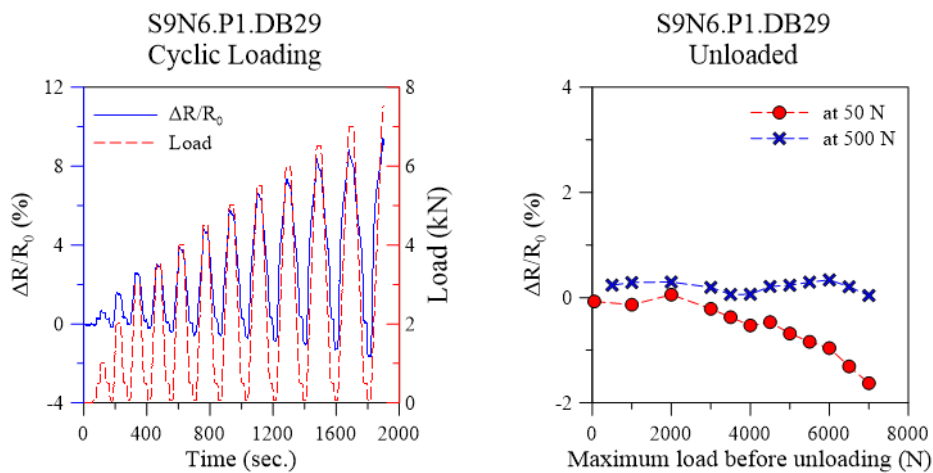


圖 5.18 S9N6 於乾燥袋 29 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



5.2.3 濕氣影響總結

試片經過烘烤後固化後，在實驗室環境會吸濕膨脹，使頻譜往長波長飄移、波形劈裂減緩、電阻上升，但不影響強度。放置於乾燥箱或乾燥袋效果幾乎一致，可去除已經吸收的溼氣，且保持試片穩定。

5.3 老化監測

5.3.1 高溫低濕處理的影響

5.3.1.1 升溫階段頻譜與電阻的變化

開始進行高溫低濕處理的試片，在升溫期間受熱膨脹，每度使頻譜往長波長 20-40 pm，且頻譜劈裂消失，如圖 5.19。這表明了試片的受熱膨脹以及殘留應變的釋放。然而電阻方面並非隨膨脹持續上升，如圖 5.20。雖然膨脹會導致電阻上升，但就像 2.2.4 節所提到的，溫度對電阻亦有反向的影響，兩機制互相抗衡。為盡可能排除濕度的影響，此試片是在乾燥袋中進行升溫。其餘試片數據置於附錄。

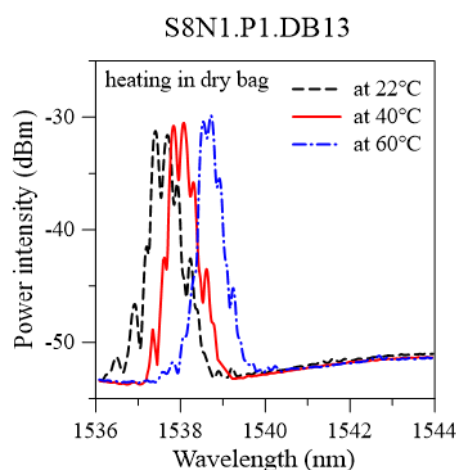


圖 5.19 S8N1 於乾燥袋中升溫期間頻譜變化

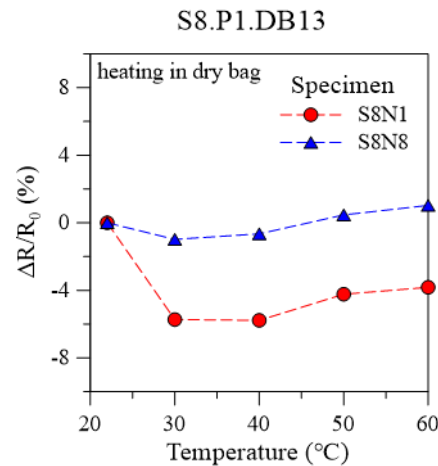


圖 5.20 S8 於乾燥袋中組，升溫期間頻譜變化

5.3.1.2 高溫低濕處理期間頻譜與電阻的變化

本節以批次 S2 的試片——先充分乾燥後放置於 RH30%、60°C 環境 75 天——為例描述高溫低濕處理期間頻譜與電阻的變化。頻譜在高溫低濕期間幾乎沒有變化。電阻在第一天小幅的上升，之後逐漸的降低，到第 55 天降低了 3%，之後穩定。

其餘試片的數據置於附錄。批次 S1 的試片未先經過乾燥處理，因此高溫低濕 0 至 3 天的變化如同乾燥對試片的影響。批次 S8 分為有無在乾燥袋中 2 組，充分乾燥後一起做高溫低濕處理 30 天，2 組接展現類似 S2N1 的變化，但第 1 天的電阻上升較為明顯，且頻譜往長波長飄移約 100 pm，批次 S3 與 S7 亦如此，因為在前乾燥期間乾燥箱濕度較 S2 時的低，所以 S3、S7、S8 有吸濕膨脹的現象。

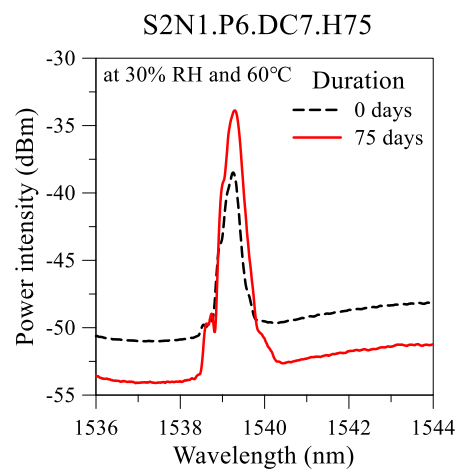


圖 5.21 S2N1 高溫低濕 75 天期間頻譜變化

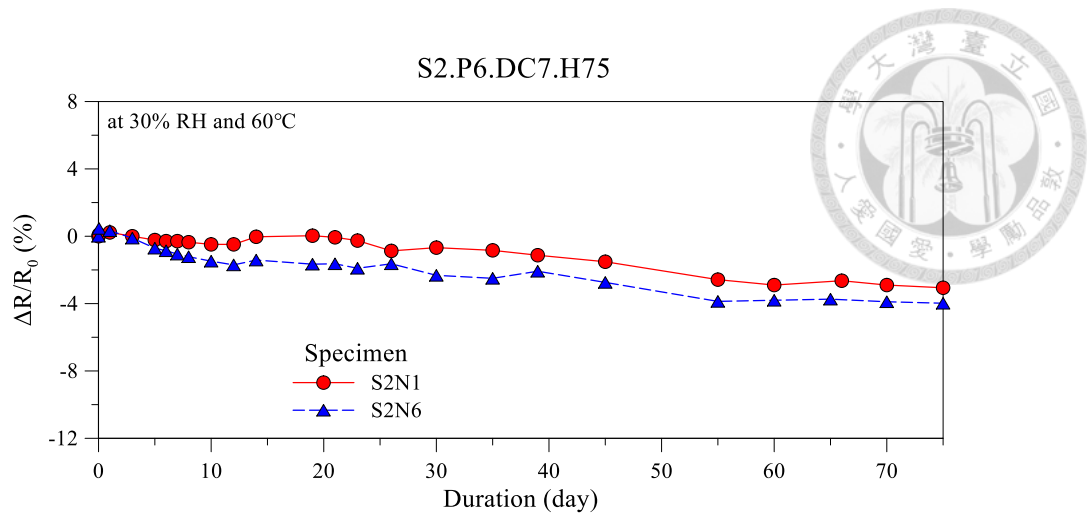


圖 5.22 S2N1 與 S2N6 高溫低濕 75 天期間電阻變化

5.3.1.3 降溫階段頻譜與電阻的變化

不論是經過高溫低濕 4、30、75 天的處理後，在溫度降回室溫的過程中，頻譜逐漸往短波長飄移且產生劈裂，如圖 5.23。這表明了試片隨著溫度的下降而收縮，且應變場又變回升溫前不均勻的分布。在電阻方面，隨著降溫而電阻逐漸升高，如圖 5.24，且高溫低濕 75 天者上升量約 2%，4 天者上升量較小，僅約 1%。不同於升溫時上下起伏的情形。由於批次 S8 分為有無在乾燥袋中 2 組，同時進行老化後降溫，展現一樣的變化，見附錄，因此可以排除降溫期間濕氣的影響。這表示經過高溫低濕處理後，試片電阻對溫度的響應變成溫度上升會降低電阻的機制在主導。

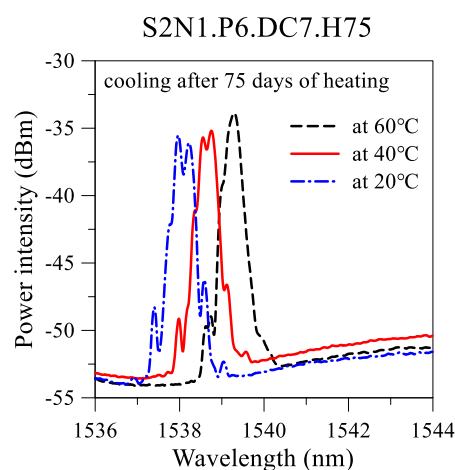


圖 5.23 S2N1 高溫低濕 75 天後降溫期間頻譜變化

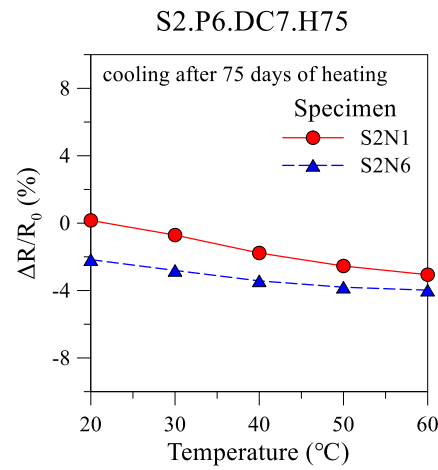


圖 5.24 S2 高溫低濕組，高溫低濕 75 天後降溫期間電阻變化

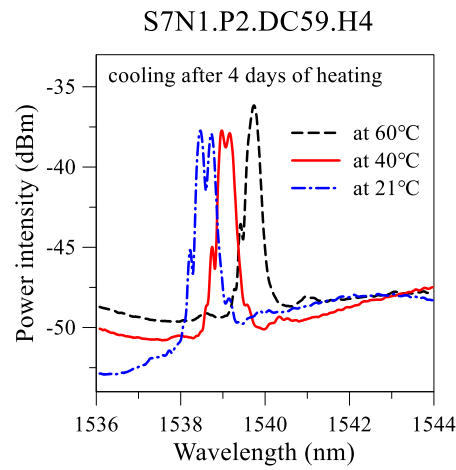


圖 5.25 S7N1 高溫低濕 4 天後降溫期間頻譜變化

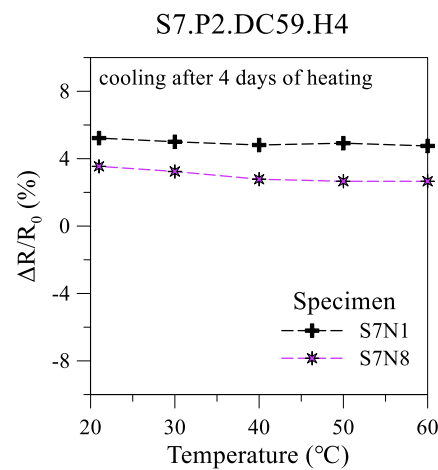


圖 5.26 S7 高溫低濕組，高溫低濕 4 天後降溫期間電阻變化

5.3.1.4 高溫低濕處理前後比較

在經過高溫低濕處理後回到室溫，進行高溫低濕處理前後的比較，可以發現其變化幾乎等同高溫低濕期間的變化。以批次 S2 的試片——先充分乾燥後放置於 RH30%、60°C 環境 75 天——為例，頻譜幾乎沒有變化，如圖 5.27。電阻僅少量變化，不足 3%。其餘試片資料置於附錄，展現類似的變化。

S3、S8 有進行後乾燥處理，然而其頻譜在後乾燥期間幾乎不變，電阻卻有些微的下降，約 2%。如圖 5.28 至圖 5.29。比對其後乾燥後電阻與 R_0 ，差異不到 3%。

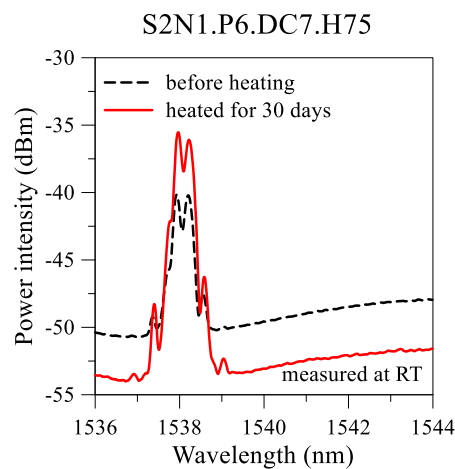


圖 5.27 S2N1 高溫低濕 75 天前後頻譜變化

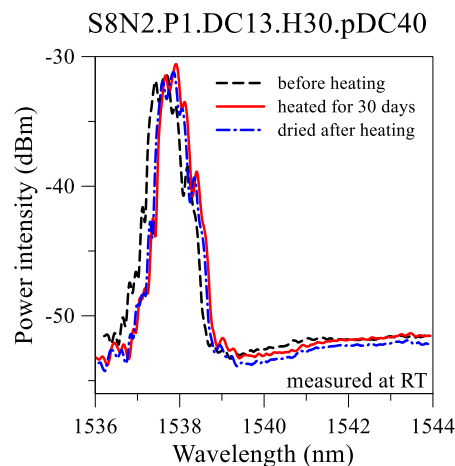


圖 5.28 S8N2 高溫低濕 30 天前後頻譜變化

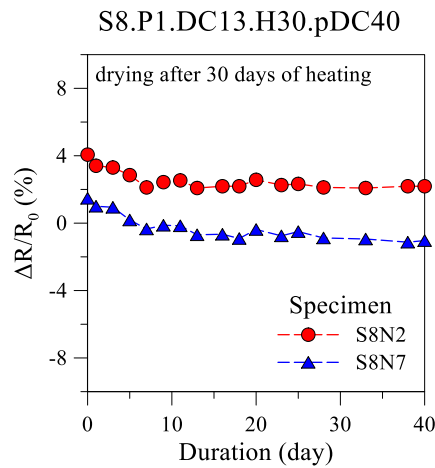


圖 5.29 S8 高溫低濕組，高溫低濕 30 天後乾燥期間電阻變化

表 5.3 高溫低濕 30 天後乾燥後的電阻與 R_0 的差異

試片	後乾燥後電阻 與 R_0 差異(%)
S3N1	-1.9
S3N7	-1.6
S8N2	2.2
S8N7	-1
S8N1	-1.6
S8N8	0

5.3.1.5 高溫低濕處理後拉伸測試

表 5.3、表 5.4 為高溫低濕處理後的試片強度變化。有無乾燥袋中進行高溫低濕 30 天，強度相近。而高溫低濕不同天數影響強度，可能是不同試片既有的離散度。

拉伸測試的部分，以 S2N1——先充分乾燥後放置於 RH30%、60°C 環境 75 天——為例，頻譜變化、電阻變化，皆與僅乾燥處理的試片無明顯區別，如圖 5.30 與圖 5.31。其餘試片資料置於附錄，有類似的結果。

表 5.4 高溫低濕 30 天有無在乾燥袋中的強度差異

高溫低濕環境	試片	個別強度 (N)	同處理平均強度(N)	變異係數 (%)	與暴露於腔室組差異(%)
暴露於 高溫低濕腔室中	S8N2	7365	7188	2.46	
	S8N7	7011			
在乾燥袋裡放置於 高溫低濕腔室	S8N1	7295	7505	2.80	4.41
	S8N8	7715			

表 5.5 高溫低濕處理後的強度變化

高溫低濕 天數	試片	個別強度 (N)	與同批 僅乾燥處理組 差異(%)	同批 僅乾燥處理組 變異係數(%)	同處理天數 強度變化 平均(%)	同處理天數 強度變化 標準差(%)
4	S7N1	8012	6.76	0.01	3.43	3.33
	S7N8	7512	0.10			
30	S1N2	7510	-2.50	3.94	-3.02	6.33
	S1N7	7994	3.78			
	S3N1	6521	-13.27	0.07		
	S3N7	7510	-0.11			
75	S2N1	6775	-12.61	3.22	-7.92	4.69
	S2N6	7503	-3.22			

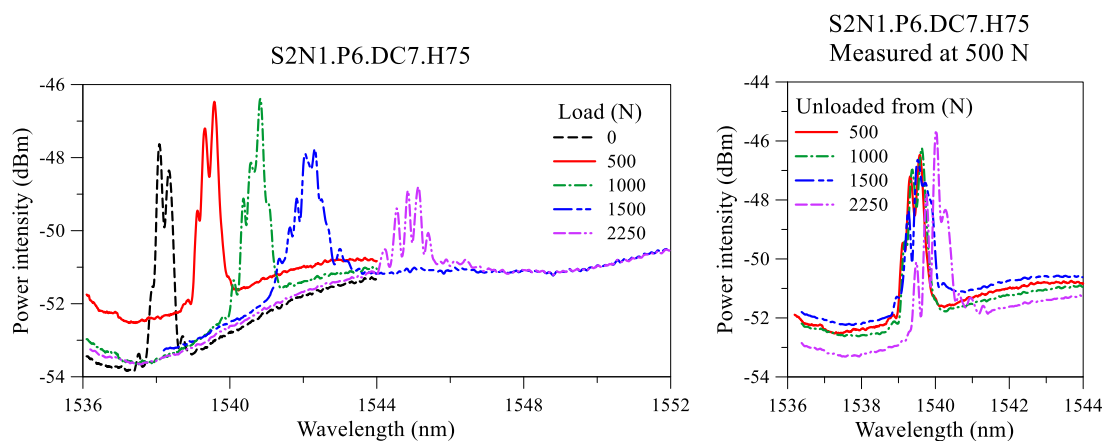


圖 5.30 S2N1 高溫低濕 75 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

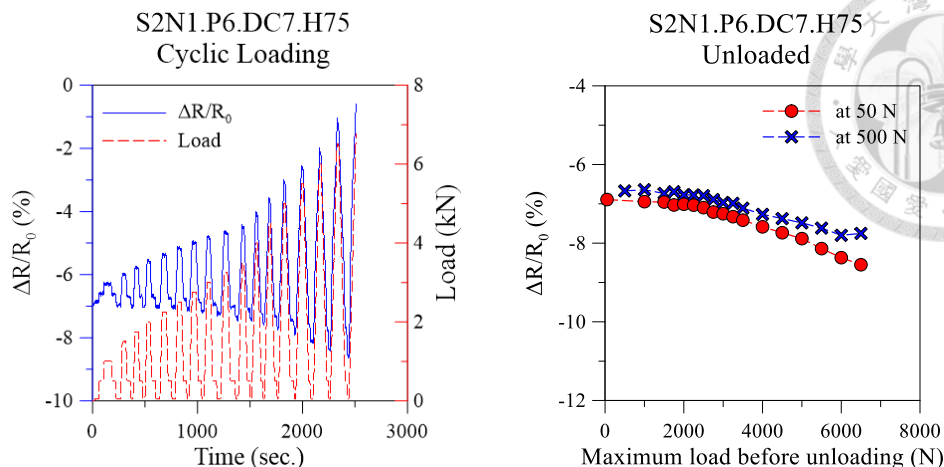


圖 5.31 S2N1 高溫低濕 75 天後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載

5.3.2 浸泡熱水處理的影響

5.3.2.1 浸泡熱水處理期間頻譜與電阻的變化

本節以批次 S2 的試片——先充分乾燥後浸泡熱水 30 天與 75 天——為例描述浸泡熱水處理期間頻譜與電阻的變化。試片在升溫期間的頻譜變化如 5.3.1 節所述。確認試片在水中達 60°C 後，頻譜在第一天往長波長飄移了約 270 pm，之後飄移速率逐漸降低，直到第 10 天共飄移了約 850 pm，之後幾乎不再變化，如圖 5.33。電阻在第 1 天上升了 6%，之後上升速率逐漸趨緩，到第 7 天升到了約 16%，之後部分試片電阻繼續趨緩的上升，部分試片電阻下降，最後逐漸穩定，如圖 5.34。其餘試片資料置於附錄。

泡入熱水 5 天前的變化，展現了如同 2.1 節所述之吸濕膨脹，基材軟化的影響亦可能在其中。其餘試片資料置於附錄，包含浸泡熱水 4 天與 30 天的試片，皆展現類似的變化。

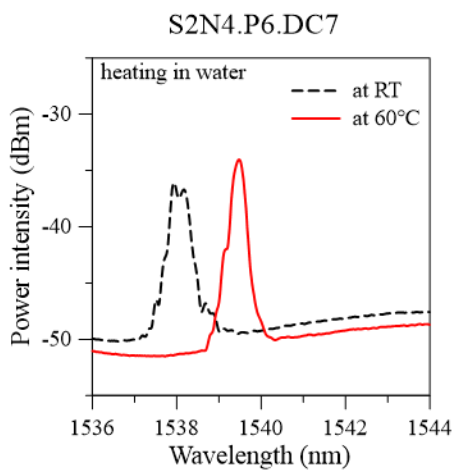


圖 5.32 S2N4 升溫頻譜變化

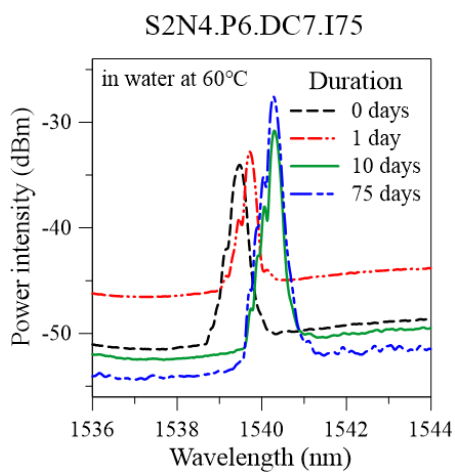


圖 5.33 S2N4 浸泡熱水 75 天期間頻譜變化

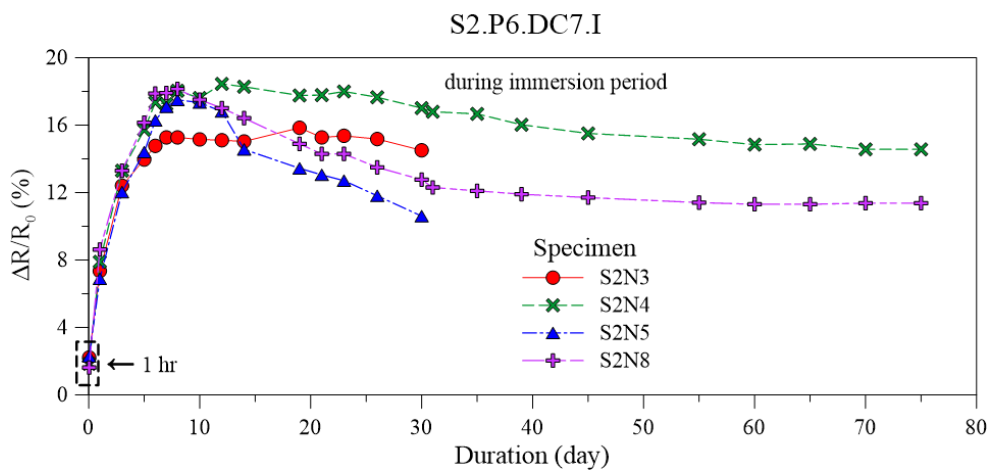


圖 5.34 批次 S2 浸泡熱水處理試片，於浸泡熱水處理期間電阻變化

5.3.2.2 浸泡熱水處理後降溫

完成浸泡熱水處理後，試片回到室溫。頻譜往短波長飄移，但未飄回浸泡熱水處理前，且波形幾乎維持在熱水中的樣子，如圖 5.35。浸泡熱水處理 4、30、75 天的試片皆展現一樣的特性。這不同於高溫低濕處理的試片會回到受熱前的劈裂狀態，可解釋為水分子浸入會緩和不均勻應變場，或是基材軟化永久地釋放了結構的不均勻應變場。

電阻方面，浸泡熱水處理 30 與 75 天的試片，比在 60°C 量測時上升了約 6%，然而浸泡熱水處理 4 天的試片則類似高溫低濕處理，無太大變化，如圖 5.36。這表示，縱使在浸泡熱水期間頻譜與電阻劇烈變化階段已結束，試片仍然持續在受溫濕老化顯著影響。

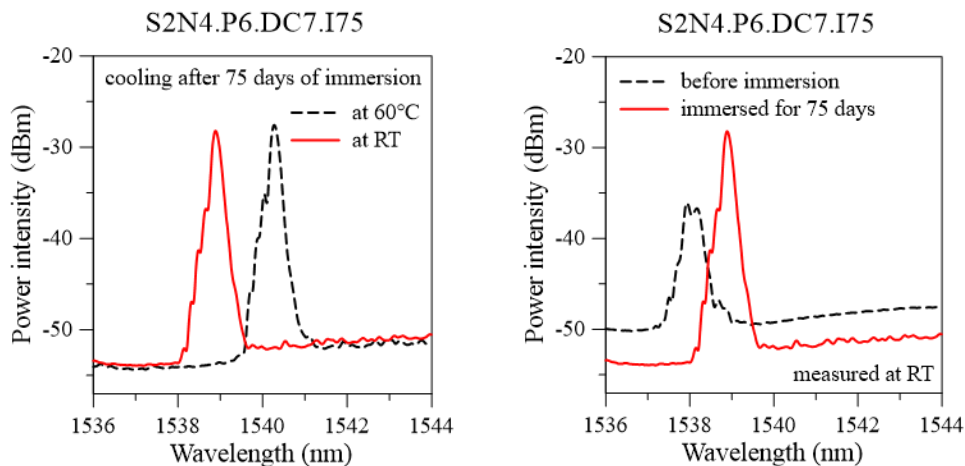


圖 5.35 S2N4 浸泡熱水 75 天 (左)後降溫頻譜變化 (右)前後頻譜變化

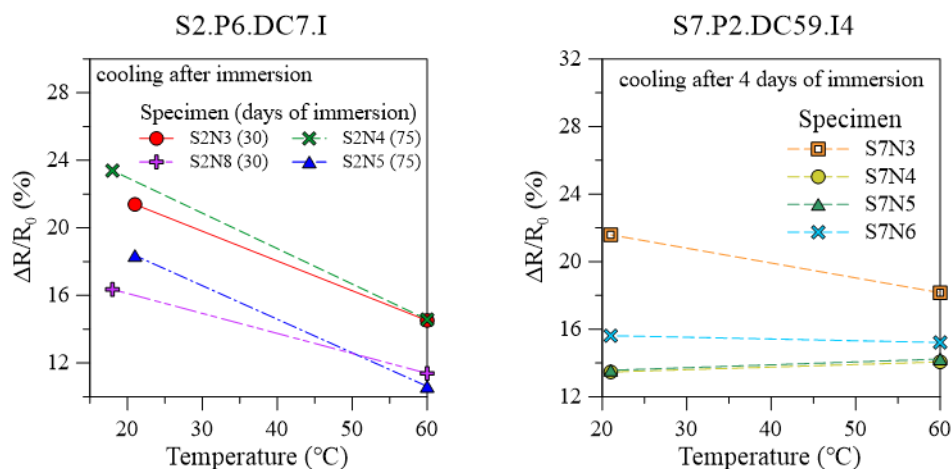


圖 5.36 降溫電阻變化：(左)S2 浸泡熱水處理 30、75 天後；(右)S7 浸泡熱水處理

4 天後

5.3.2.3 浸泡熱水處理後乾燥與前後比較

為了瞭解試片吸水後能回復到甚麼程度及對拉伸試驗的影響，將部分試片進行後乾燥處理，本節以 S8——充分乾燥再浸泡熱水 30 天後乾燥——的試片為例說明。在後乾燥期間，頻譜有些微的變形，表示水分確實有緩和和不均勻應變場的效果。且頻譜逐漸往短波長飄移，飄移速率逐漸放緩，約 30 天後幾乎不再變化，不會回到泡水前的位置，如圖 5.37。電阻則是逐漸降低，趨於穩定，40 天下降了約 15%，如圖 5.38。如同乾燥的趨勢。其餘試片資料置於附錄，展現類似的變化。

表 5.6 為浸泡熱水電阻前後比較。頻譜不會回到泡水前的位置，表示試片浸泡熱水 30 天後發生的不可逆的變形，且電阻也比泡水前上升，泡水 4 天的上升程度較小，表示電阻有感測溫濕老化發展的潛力。

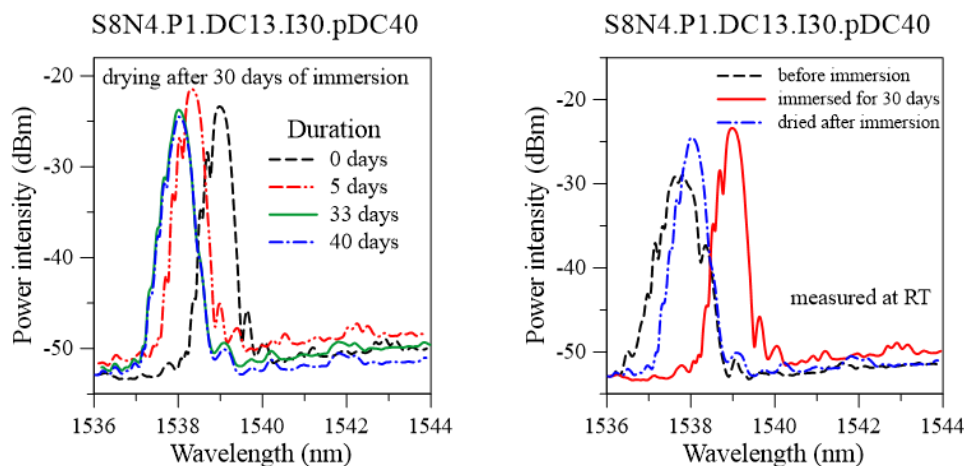


圖 5.37 S8N4 浸泡熱水 30 天 (左)後乾燥期間 (右)泡水前後 頻譜變化

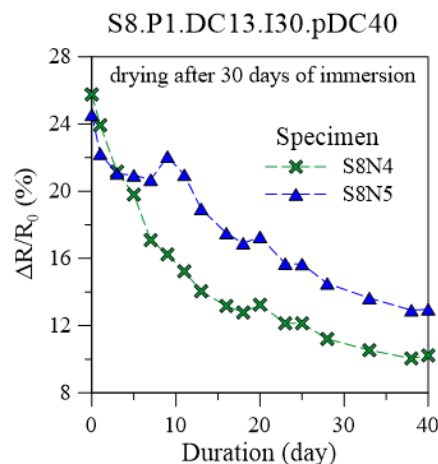


圖 5.38 S8 浸泡熱水 30 天後乾燥期間電阻變化



表 5.6 浸泡熱水電阻前後比較

浸泡熱水 天數	試片	浸泡熱水結束 回室溫後電阻 與R ₀ 差異(%)	後乾燥後電阻 與R ₀ 差異(%)
4	S7N4	13.5	
	S7N6	15.6	
30	S2N3	21.4	5.4
	S2N5	18.4	3.1
	S3N4	26.1	
	S3N5	47.1	
	S3N2	29.3	15.7
	S3N8	34.5	21.5
	S8N3	21.0	
	S8N6	34.1	
	S8N4	25.8	10.2
	S8N5	24.5	13.0
75	S2N4	23.4	
	S2N8	16.4	

5.3.2.4 浸泡熱水後拉伸測試

表 5.5 為經過浸泡熱水 4、30、75 天處理後不乾燥的試片強度變化。可以發現，浸泡熱水 4 天強度已下降 26.67%。浸泡熱水 30 天與 75 天僅比浸泡熱水 4 天下降不足 10%的僅乾燥處理試片強度。另外比較浸泡熱水 30 天後有無後乾燥的試片強度，如表 5.6，可以發現，強度會些微恢復，恢復量不到 9%的無後乾燥試片強度。

嘗試建立浸泡熱水電阻監測與強度變化的關聯，將不後乾燥處理的試片，以完成浸泡熱水處理回室溫後的電阻進行比較，可以發現僅泡水 4 天的試片電阻變化較少，強度也較高，如圖 5.39。

拉伸期間的頻譜變化，縱使泡水 30 天後，不論有無後乾燥，皆與僅乾燥處理的試片無明顯區別，如圖 5.39 與圖 5.40。

至於拉伸期間的電阻變化，不同批試片展現的變化並不一致，難以以此做為判斷老化程度的依據。

表 5.7 浸泡熱水不同天數後的強度變化

浸泡熱水 天數	試片	個別強度 (N)	與同批 僅乾燥處理組 差異(%)	同批 僅乾燥處理組 變異係數(%)	同處理天數 強度變化 平均(%)	同處理天數 強度變化 標準差(%)
4	S7N4	5503	-26.67	0.01	-26.67	0.00
	S7N6	5503	-26.67			
30	S1N4	4513	-41.41	3.94	-35.57	3.48
	S1N5	5005	-35.02			
	S3N4	5043	-32.93	0.07		
	S3N5	5042	-32.94			
75	S2N4	5003	-35.47	3.22	-35.57	0.10
	S2N8	4987	-35.68			

表 5.8 浸泡熱水 30 天有無後乾燥的強度差異

批次	有無 後乾燥	試片	個別強度 (N)	同批同處理 平均強度(N)	變異係數 (%)	與無後乾燥組 差異(%)
S1	無	S1N4	4513	4759	5.17	
		S1N5	5005			
	有	S1N1	5346	5071	5.42	6.56
		S1N8	4796			
S3	無	S3N4	5043	5042.5	0.01	
		S3N5	5042			
	有	S3N2	5005	5100	1.86	1.14
		S3N8	5195			
S8	無	S8N3	5009	5008.5	0.01	
		S8N6	5008			
	有	S8N4	5383	5442	1.08	8.66
		S8N5	5501			

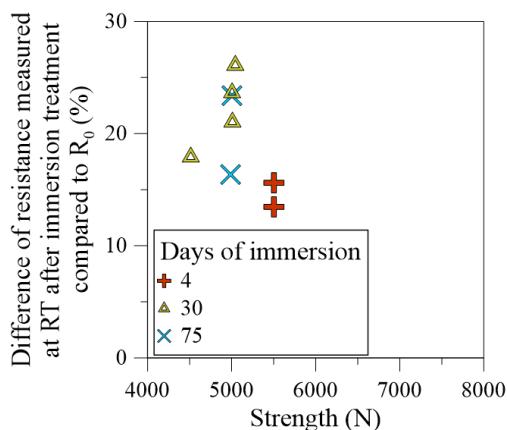


圖 5.39 浸泡熱水不後乾燥的試片，浸泡熱水後回室溫的電阻與強度關聯

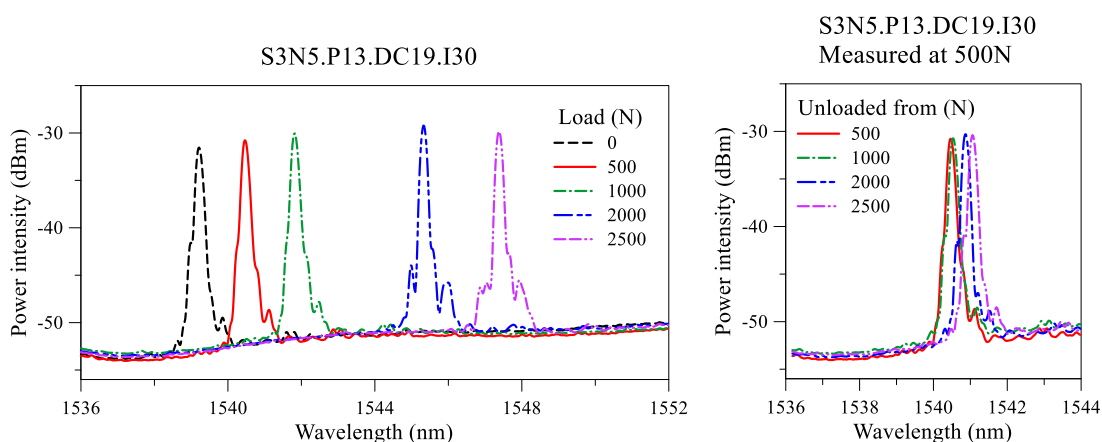


圖 5.40 S3N5 浸泡熱水 30 天後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

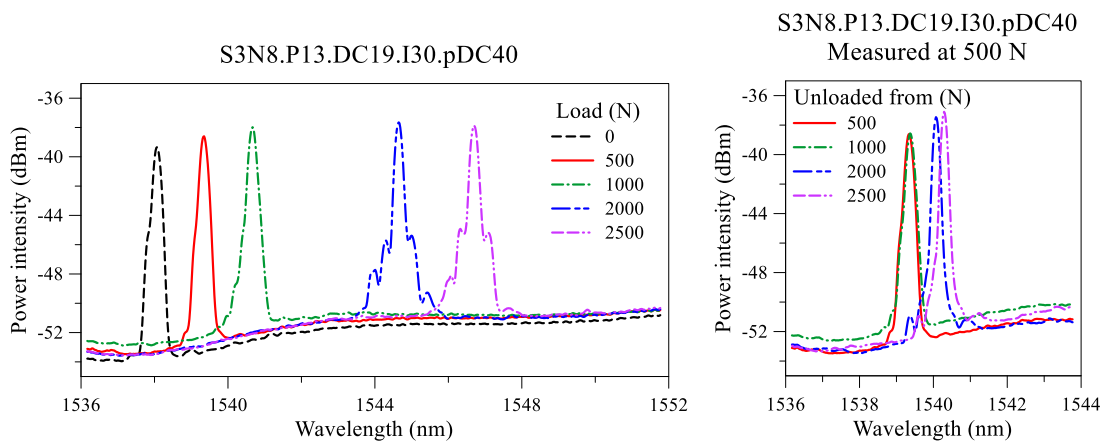


圖 5.41 S3N5 浸泡熱水 30 天後乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N

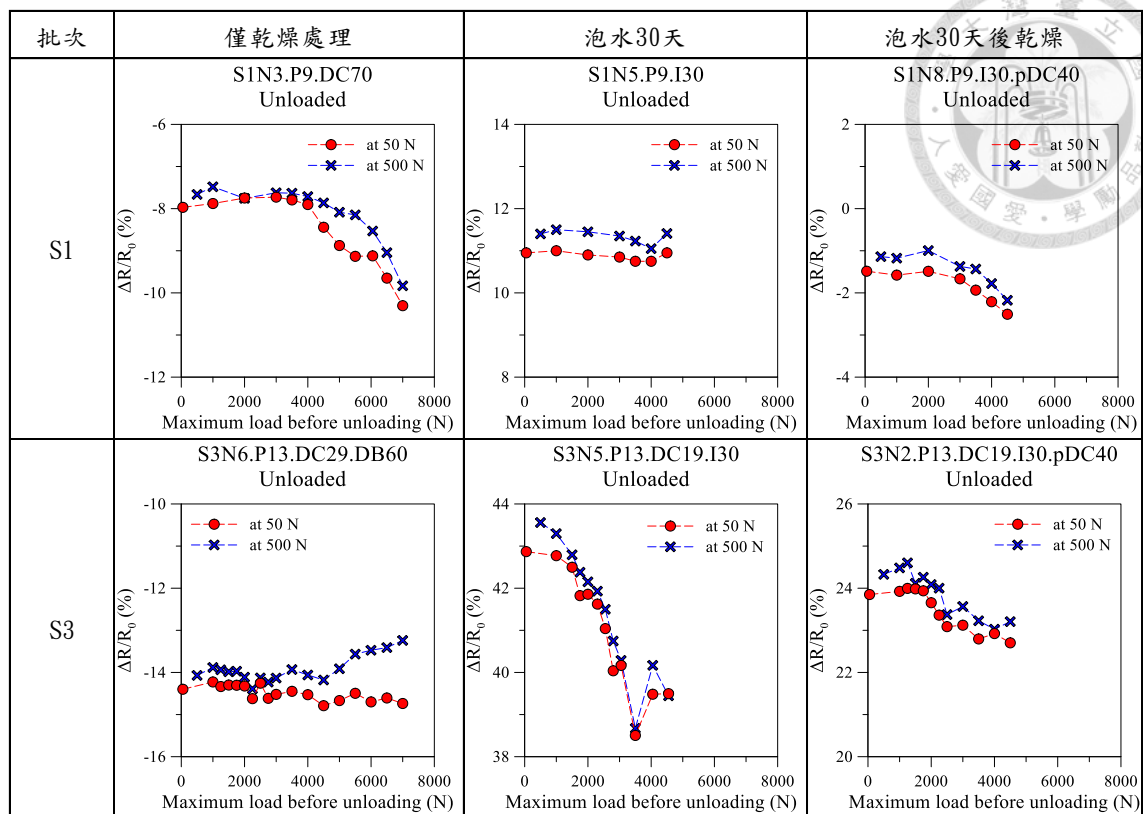


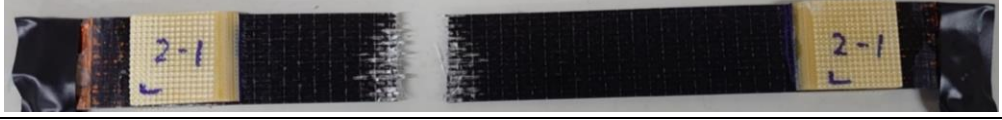
圖 5.42 難以用拉伸時的電阻變化判斷濕熱老化程度

5.3.3 不同處理後拉伸破斷外觀

5.3.3.1 宏觀

表 5.7 為僅乾燥處理(S2N7)、高溫低濕 75 天(S2N1)、浸泡熱水 4 天(S7N4)、浸泡熱水 30 天(S8N3)、浸泡熱水 30 天後乾燥(S3N2) 的典型拉伸破斷外觀，其餘試片外觀置於附錄。高溫低濕處理與僅乾燥處理的試片無明顯差異。但浸泡熱水 30 天的試片幾乎無脫層以及表層 0 度方向纖維沿施力方向的割裂，浸泡熱水 4 天的試片脫層以及割裂程度較輕微。

表 5.9 不同實驗處理的典型拉伸破斷外觀

實驗處理	斷裂外觀
僅乾燥處理	
高溫低濕 75天	
浸泡熱水 4天	
浸泡熱水 30天	
浸泡熱水 30天 後乾燥	

5.3.3.2 微觀

觀察 0 度層纖維與樹脂介面的情形。僅乾燥處理的試片(S3N3)仍有點樹脂附著於纖維上，且附著的樹脂有塑性變形的情形，如圖 5.43。高溫低濕處理 30 天的試片(S3N1)也是有點樹脂附著於纖維上，但附著的樹脂外觀為片狀，如圖 5.44。浸泡熱水 75 天的試片(S2N8) 也有部分纖維是有點樹脂附著，如圖 5.45。

觀察斷面上 0 度層樹脂的型態。僅乾燥處理的試片(S3N3)部分區域有類似人字文的特徵，同時有塑性變形的產物，如圖 5.46、圖 5.47。還有一些區域是光亮的斷面，也同時有塑性變形的產物，如圖 5.46、圖 5.48。高溫低濕處理 30 天的試片(S3N1)也是有點紋路與塑性變形產物，如圖 5.49、圖 5.50。浸泡熱水 75 天的試片(S2N8) 也是有點紋路與塑性變形產物，如圖 5.51、圖 5.52。

觀察脫層面，僅乾燥處理的試片(S3N3)有許多纖維剝離後留下的樹脂溝槽，且溝槽間的樹脂片狀裂開被拉起，如圖 5.53。高溫低濕處理 30 天的試片(S3N1)也是，如圖 5.54。浸泡熱水 75 天的試片(S2N8) 也是類似的情形，但樹脂裂開被拉起的角度更大，如圖 5.55。

綜合上述電子顯微鏡觀測，不同實驗處理的試片在微觀上並無明顯差異。

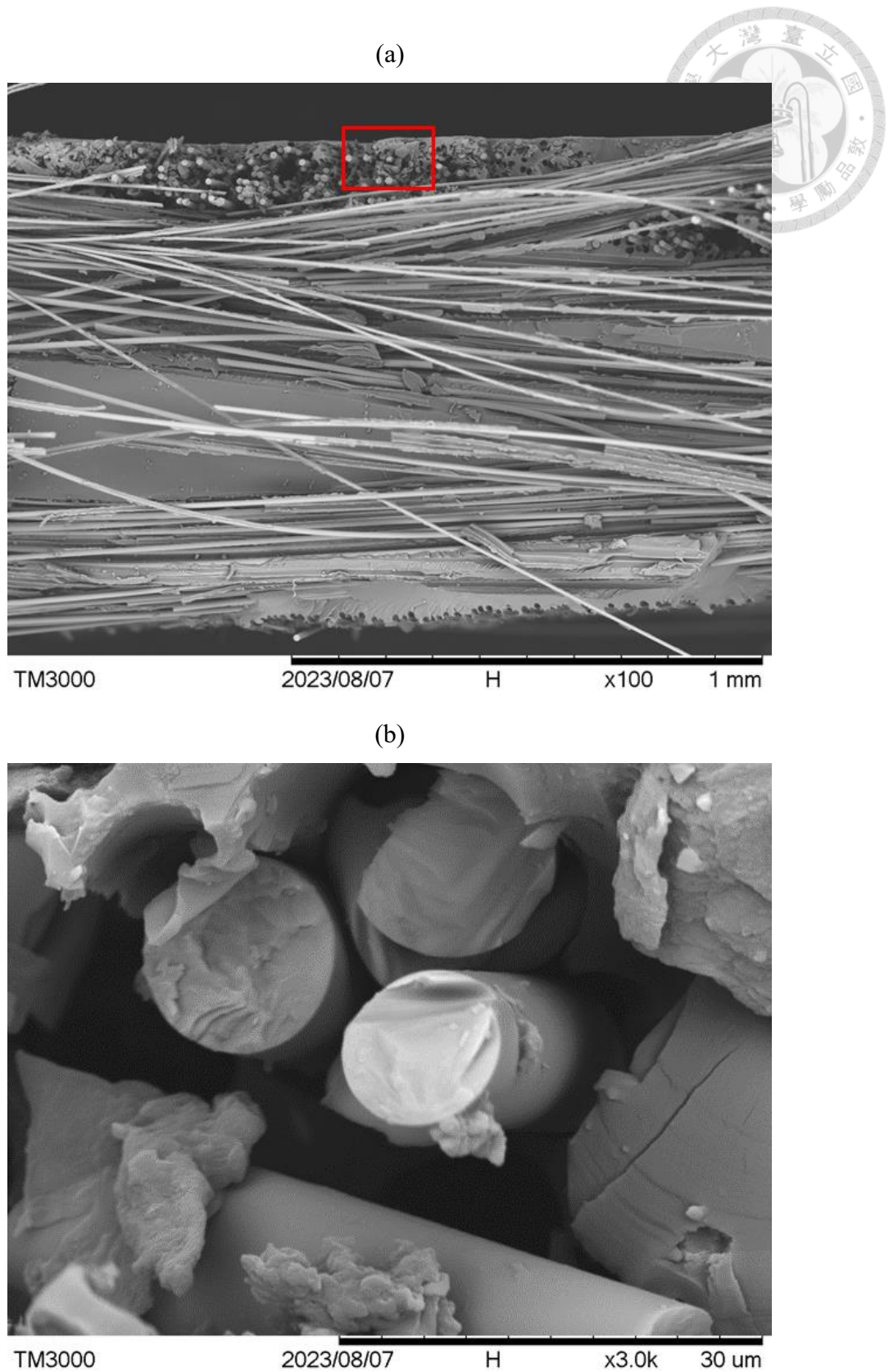
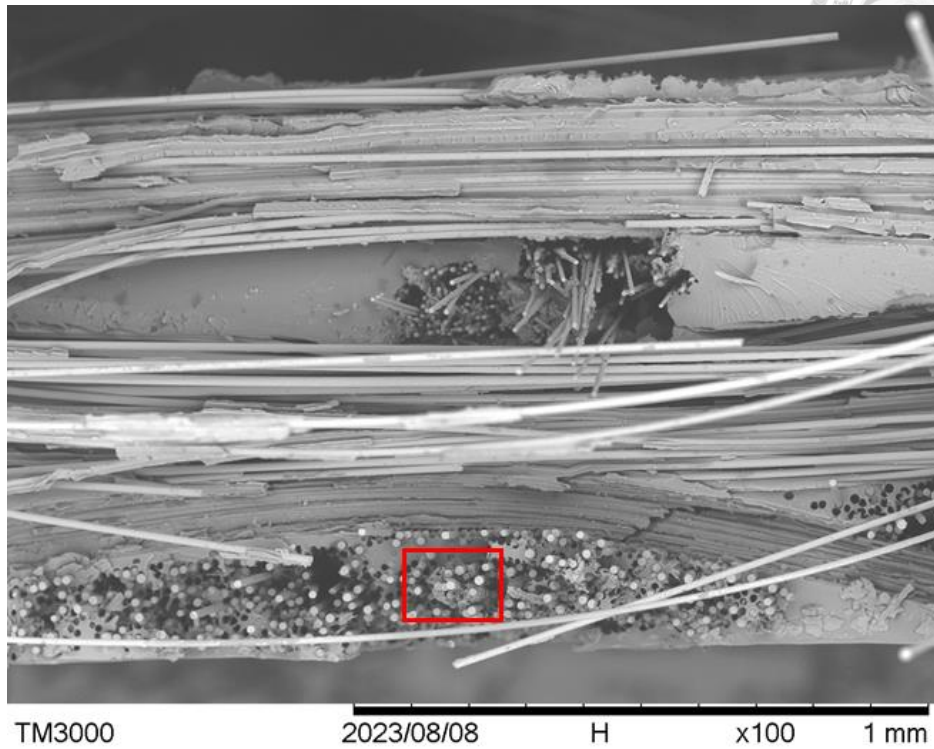


圖 5.43 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a)放大倍率 100 倍；(b)放大倍率 3000 倍

(a)



(b)

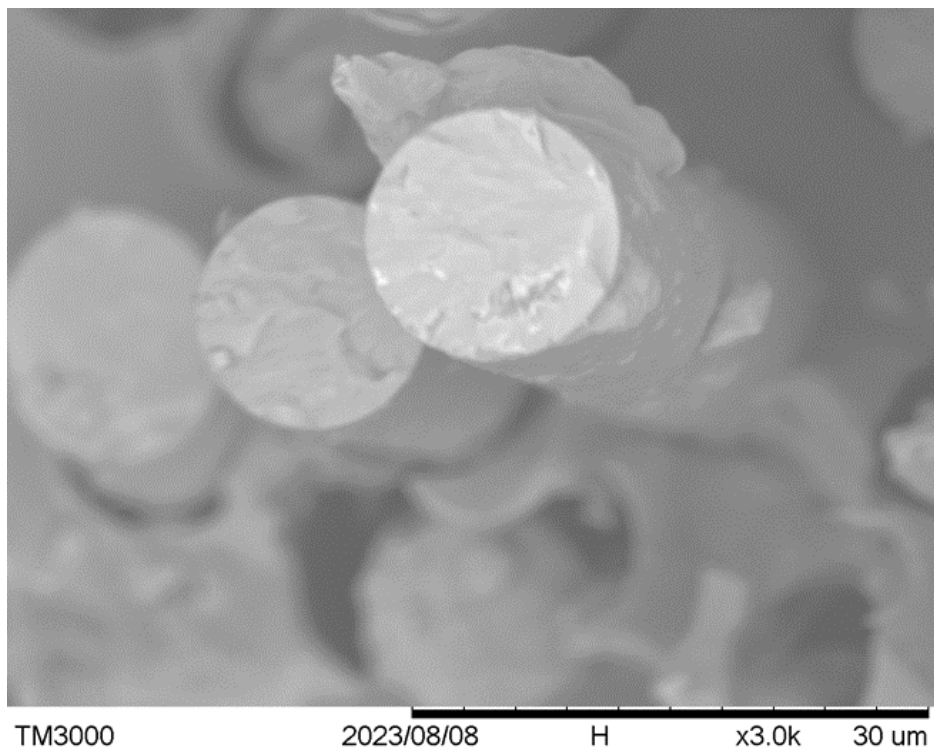


圖 5.44 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a) 放大倍率 100 倍；(b)放大倍率 3000 倍

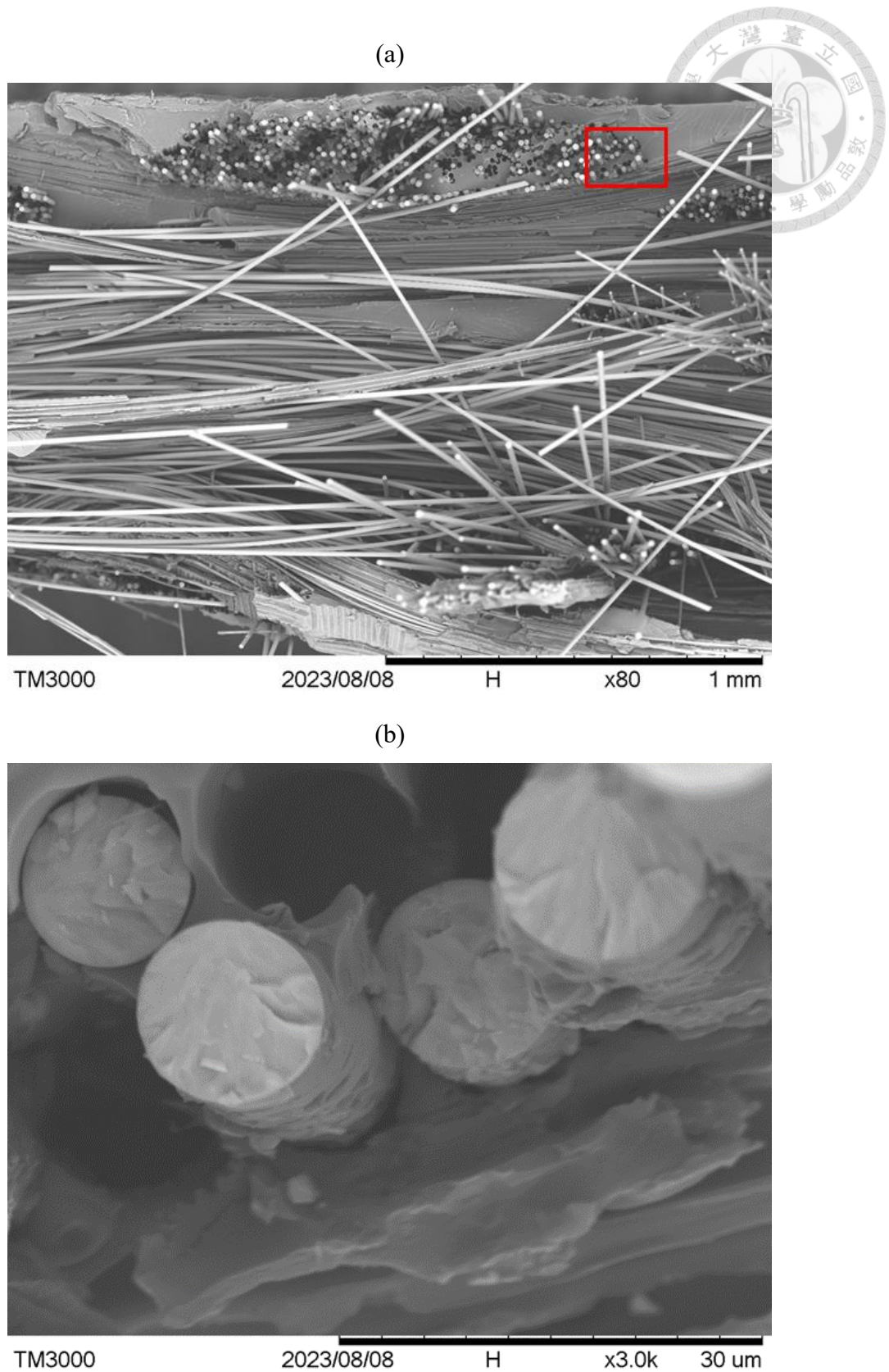


圖 5.45 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面部分 0 度層纖維仍有樹脂附著：(a) 放大倍率 80 倍；(b)放大倍率 3000 倍

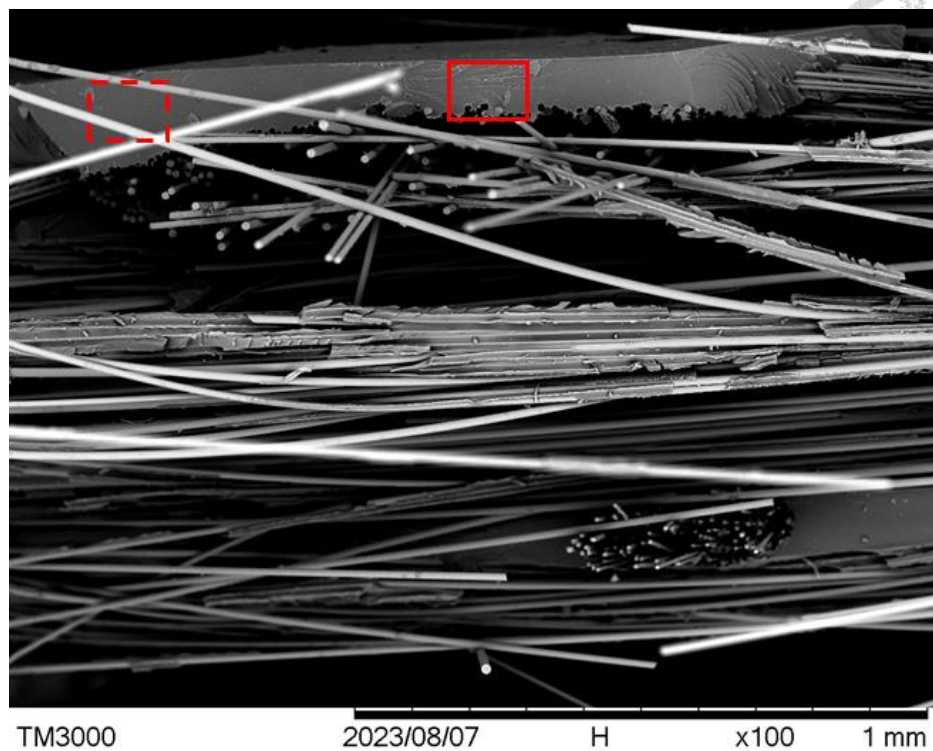
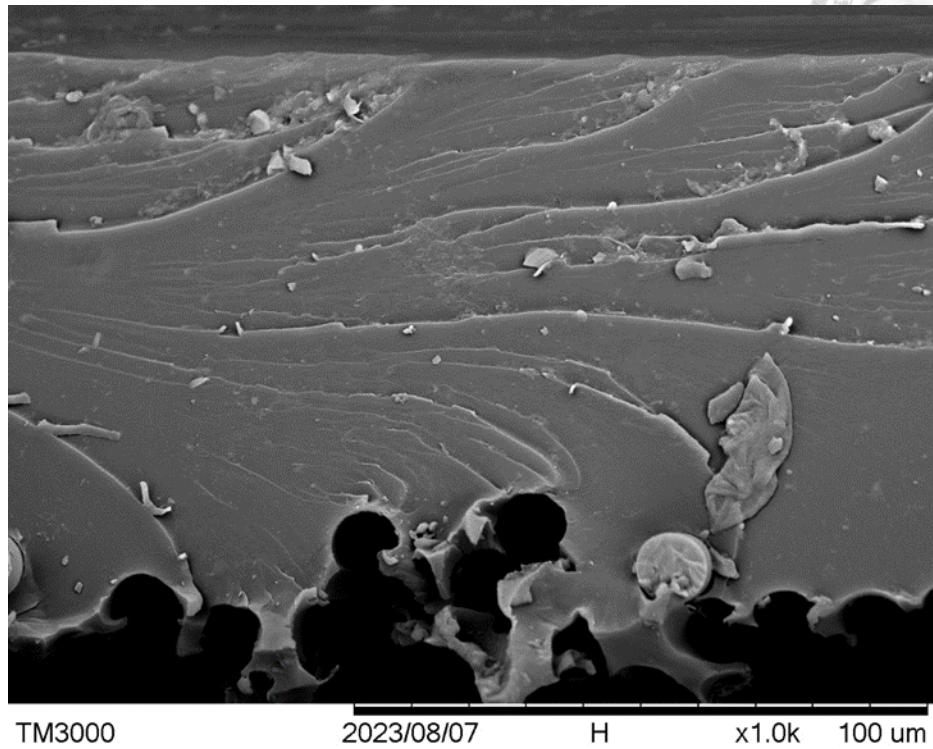


圖 5.46 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂：實線框為類似人字文特徵的位置，虛線框為光亮斷面位置

(a)



(b)

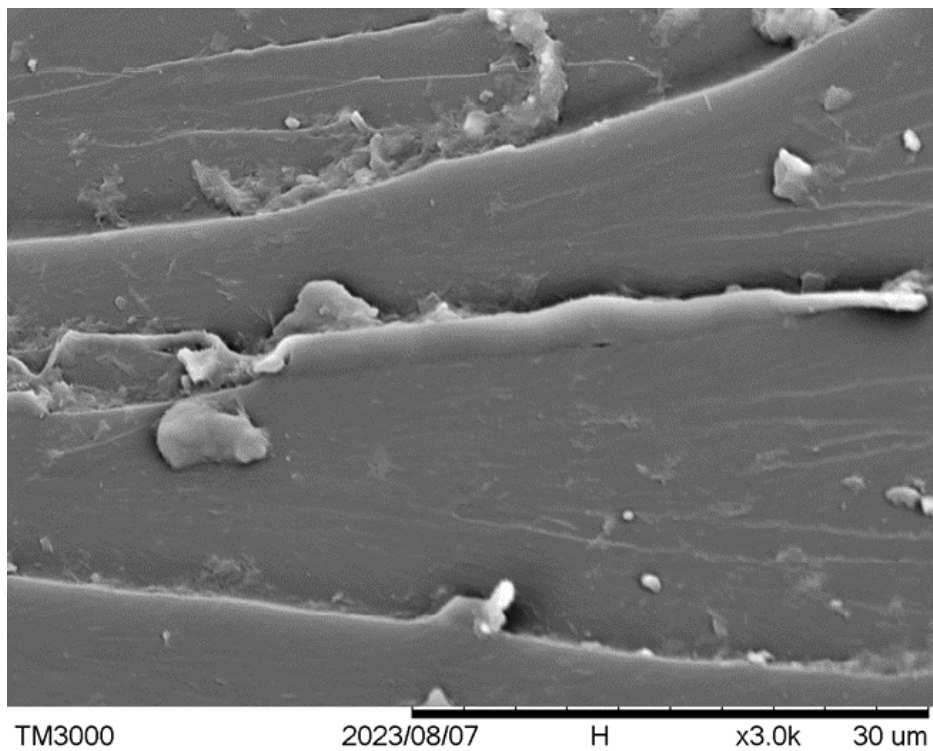
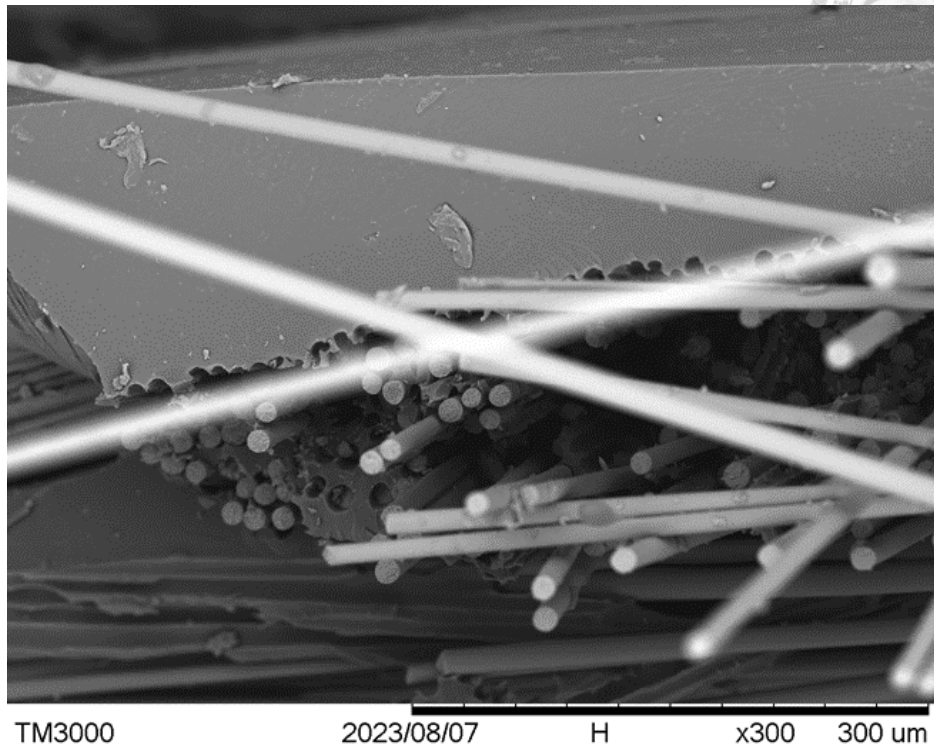


圖 5.47 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂有類似人字文的特徵與塑性變形

產物：(a)放大倍率 1000 倍；(b)放大倍率 3000 倍

(a)



(b)

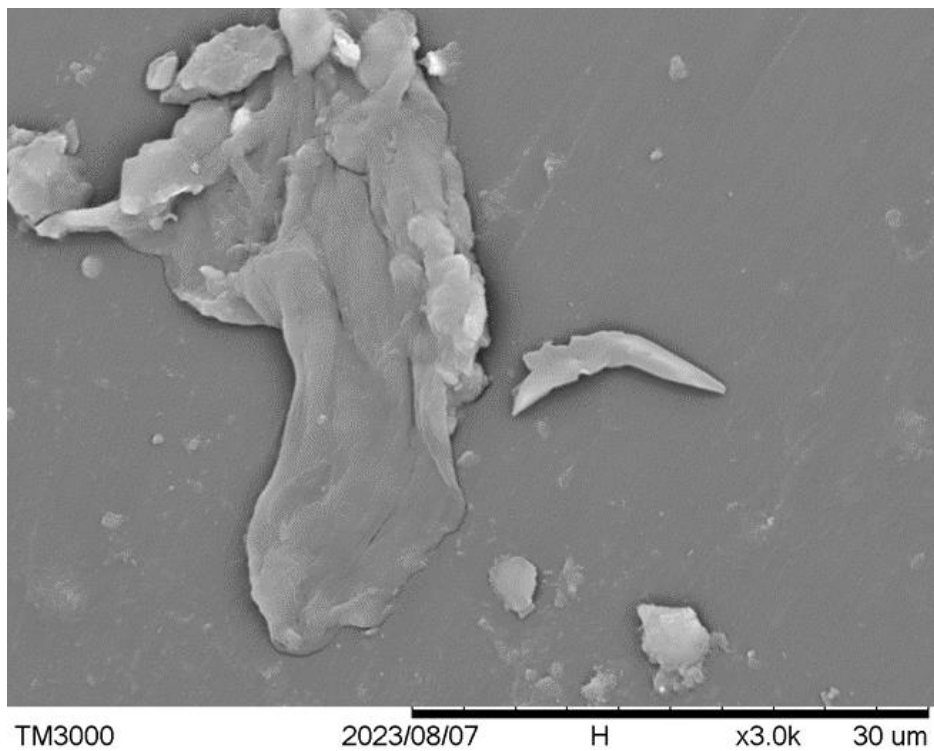


圖 5.48 S3N3 僅乾燥處理後拉伸斷面 0 度層樹脂光亮斷面與塑性變形產物：(a)放大倍率 300 倍；(b)放大倍率 3000 倍

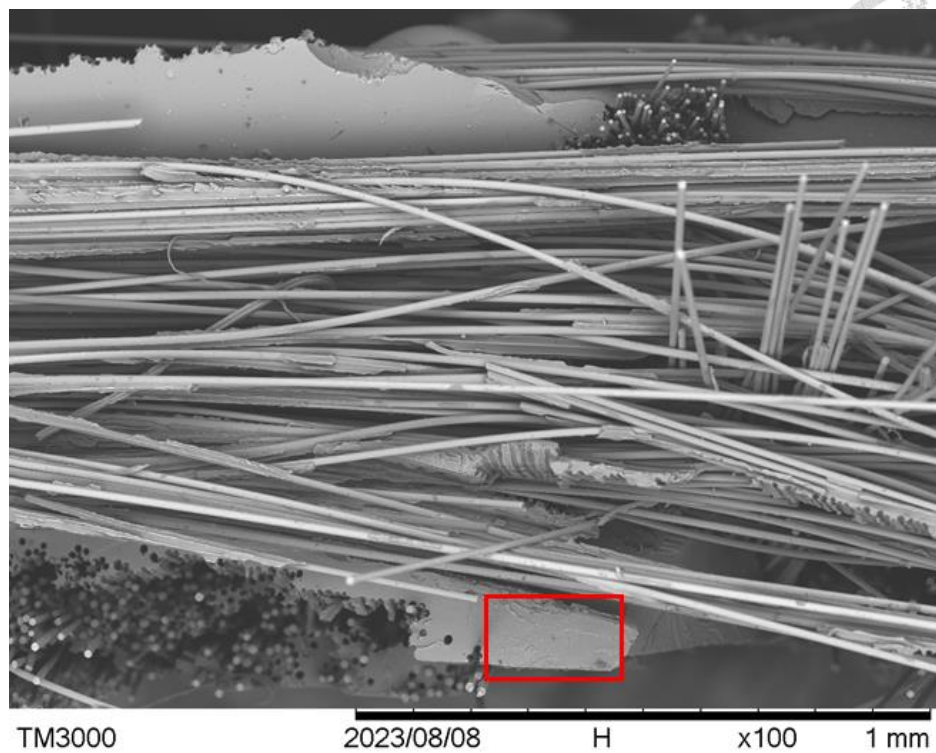
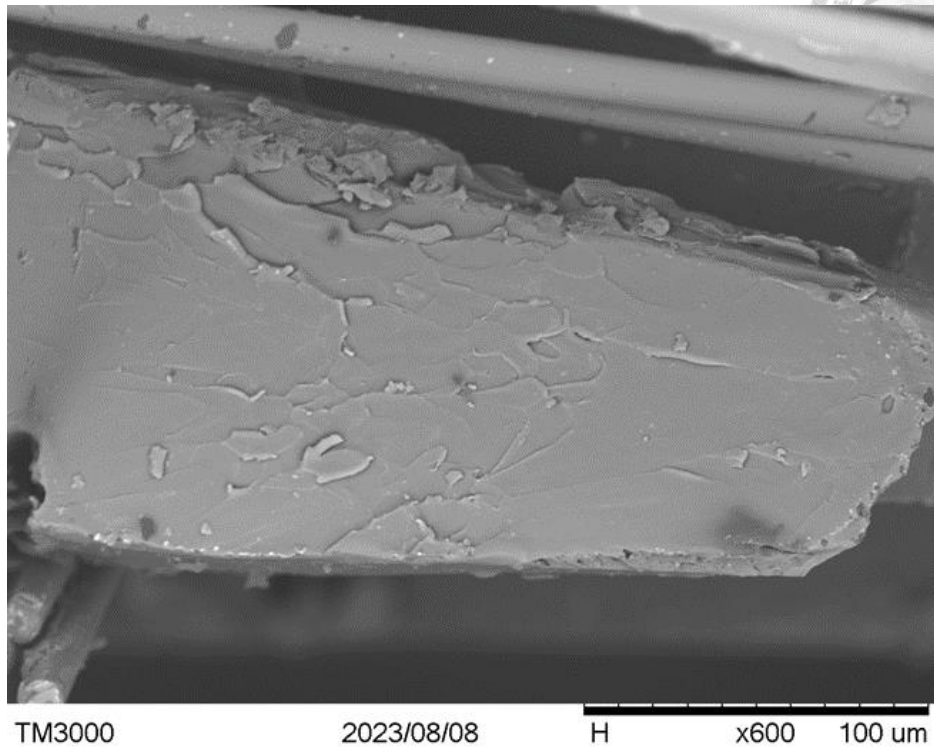


圖 5.49 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層樹脂特徵位置

(a)



(b)

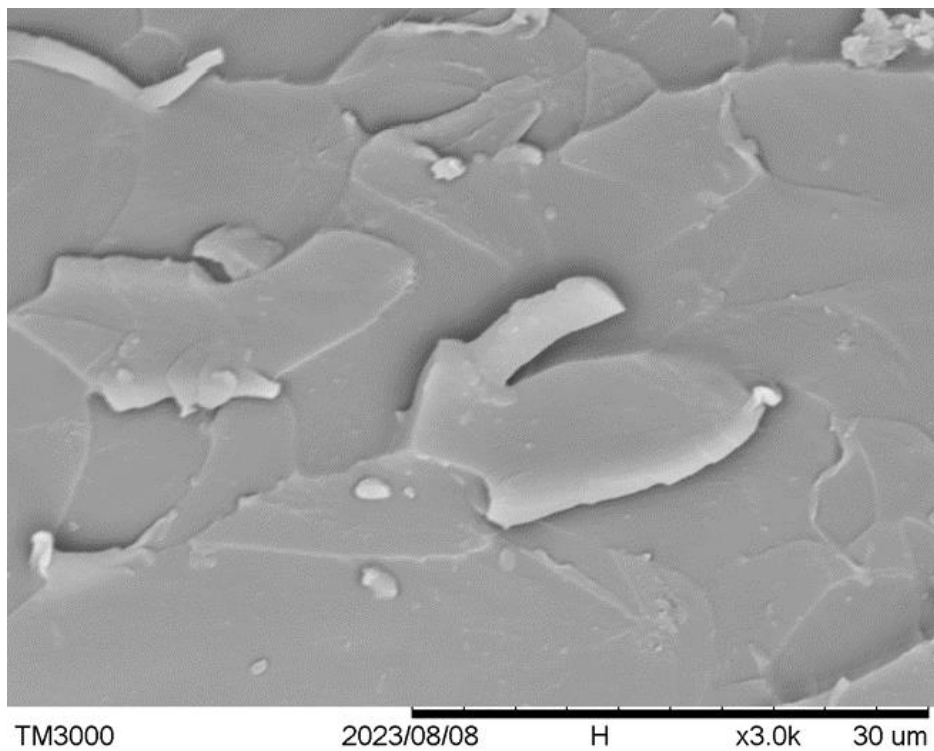


圖 5.50 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸斷面 0 度層樹脂有些紋路與塑性變形產物：(a) 放大倍率 600 倍；(b)放大倍率 3000 倍

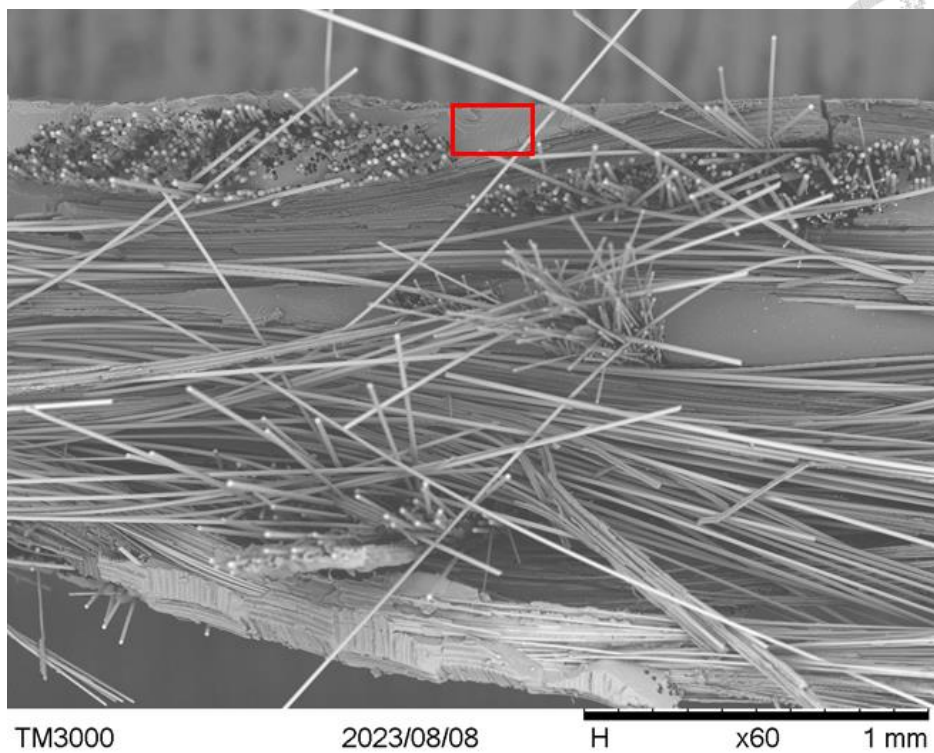


圖 5.51 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面 0 度層樹脂特徵位置

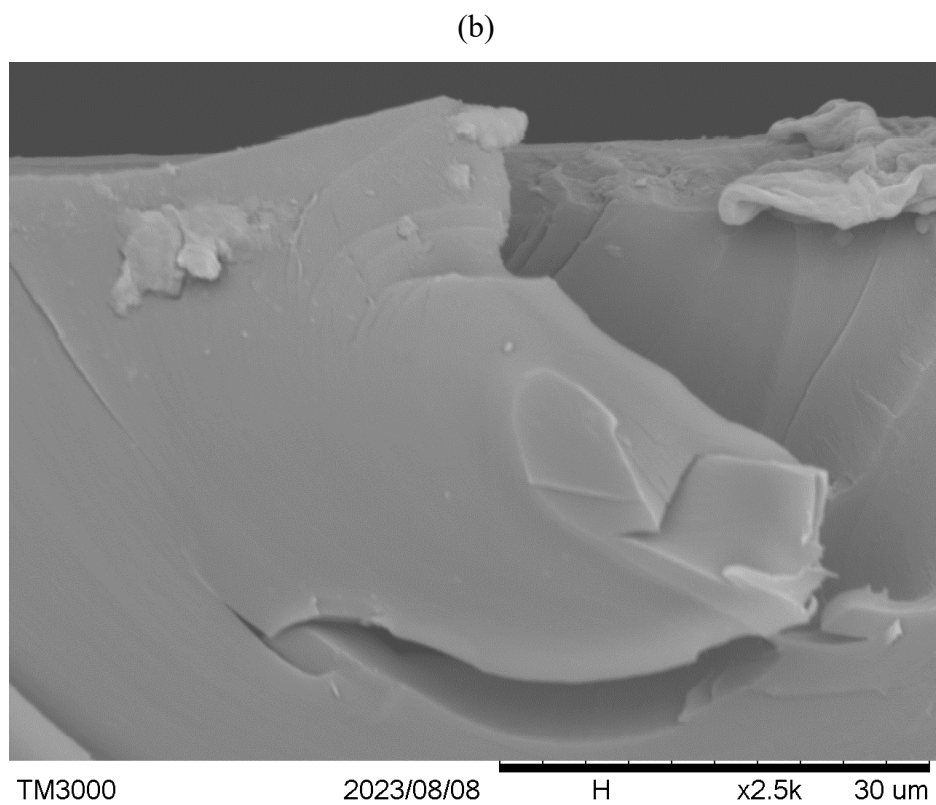
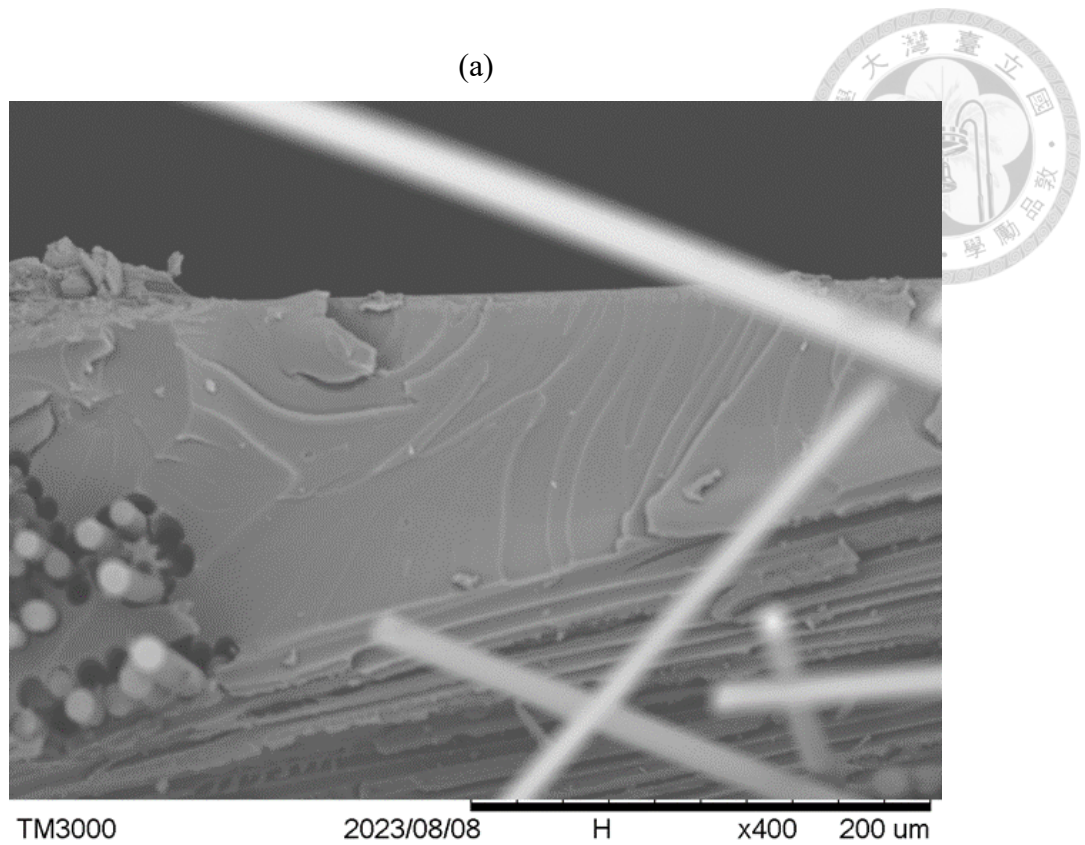
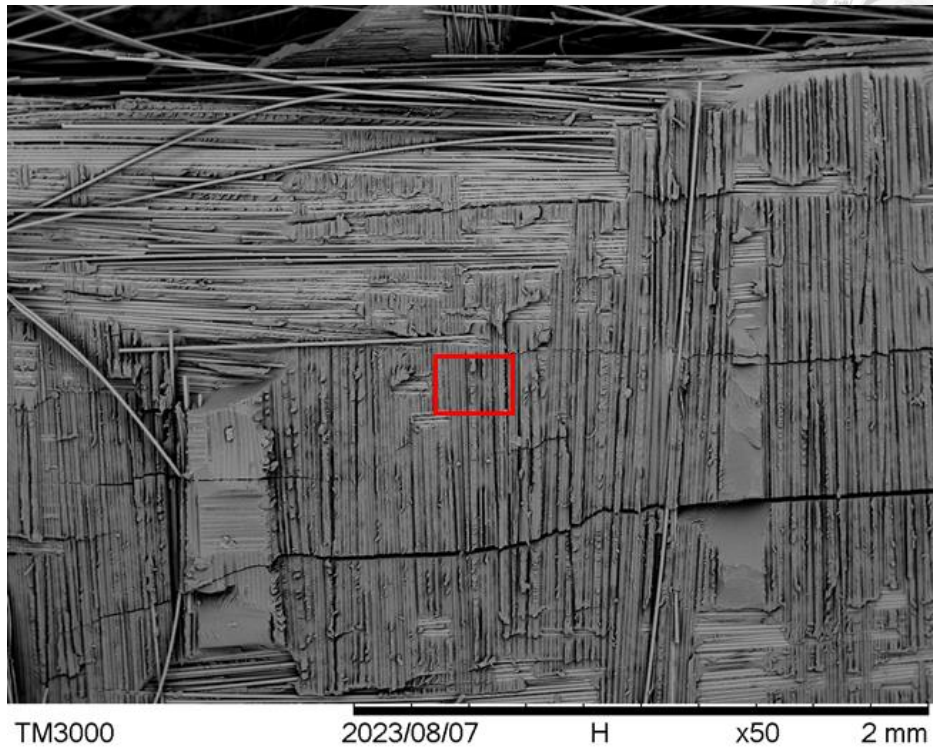


圖 5.52 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸斷面 0 度層樹脂有些紋路與塑性變形產物：(a) 放大倍率 400 倍；(b)放大倍率 2500 倍

(a)



(b)

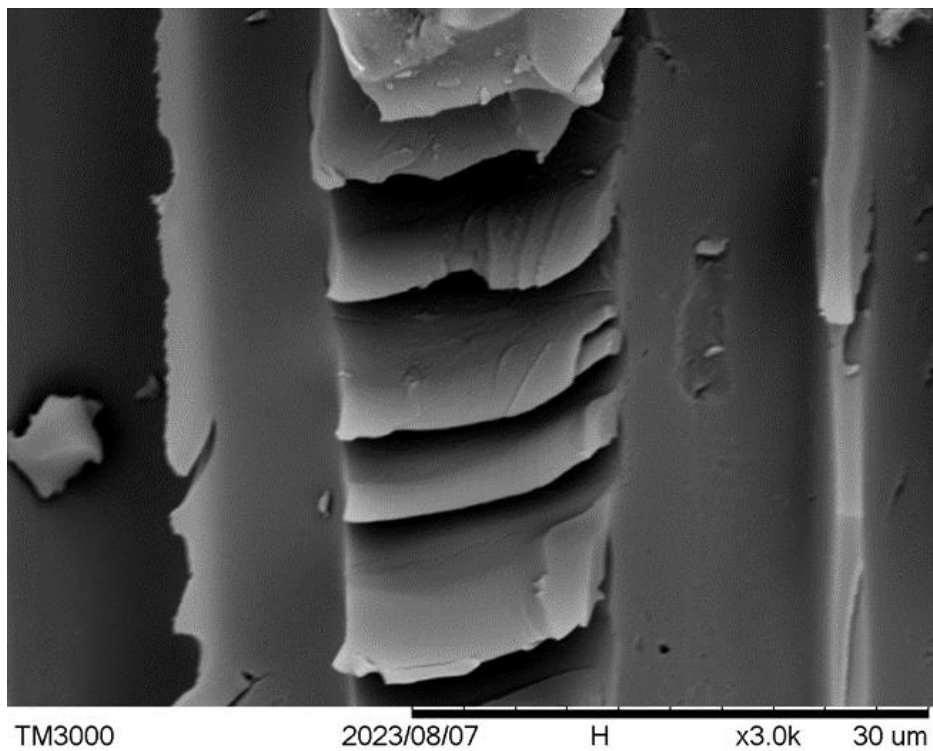
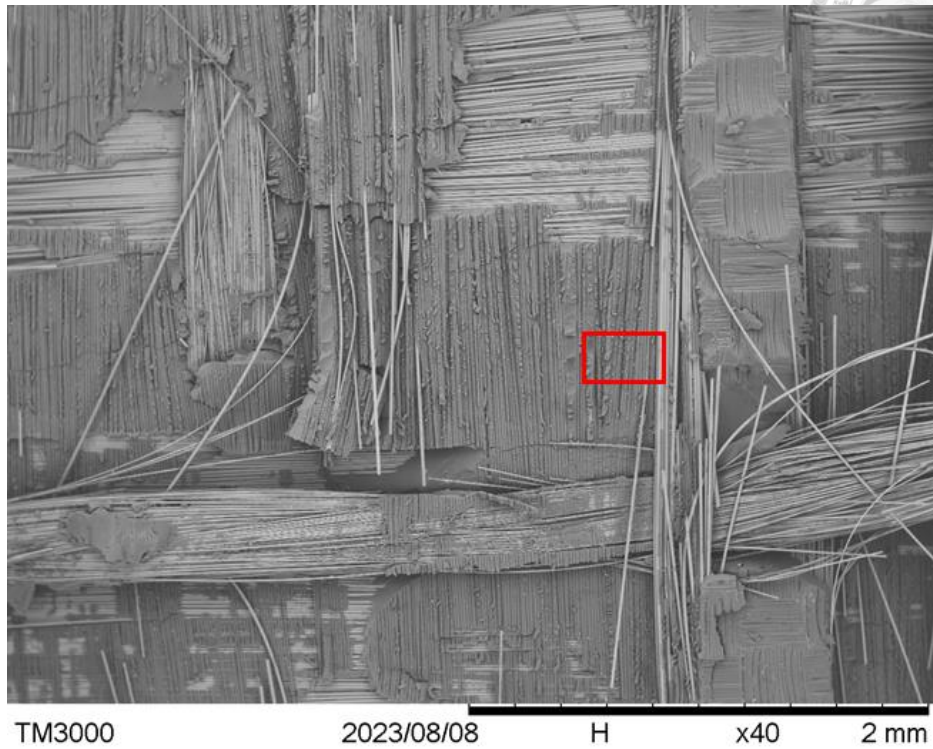


圖 5.53 S3N3 僅乾燥處理後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 50 倍；
(b)放大倍率 3000 倍

(a)



(b)

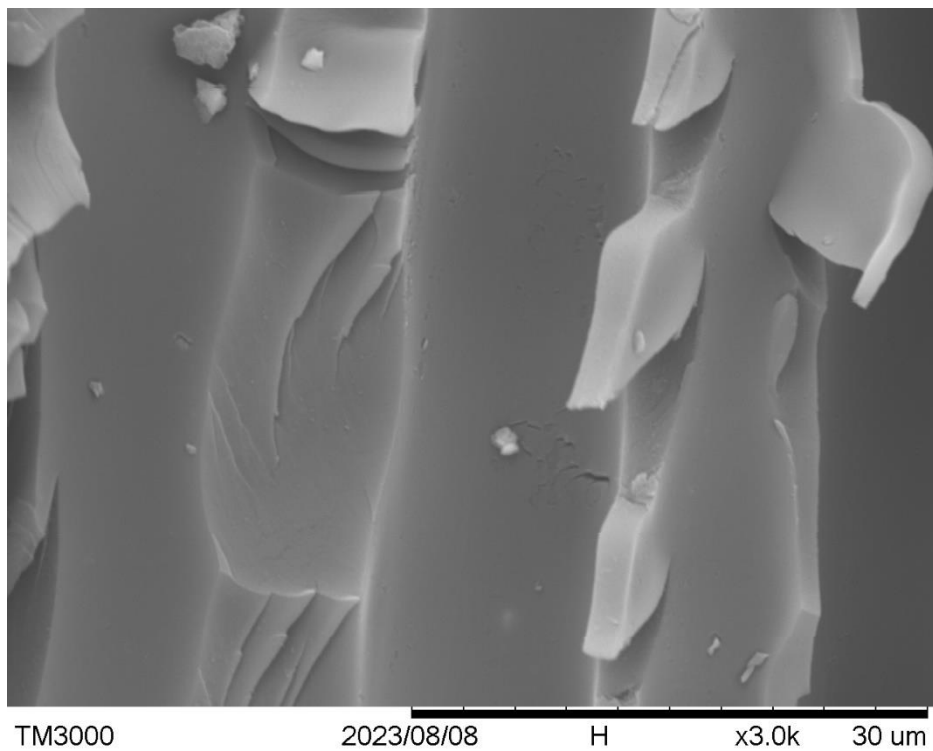


圖 5.54 S3N1 高溫低濕 30 天後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 40 倍；(b)放大倍率 3000 倍

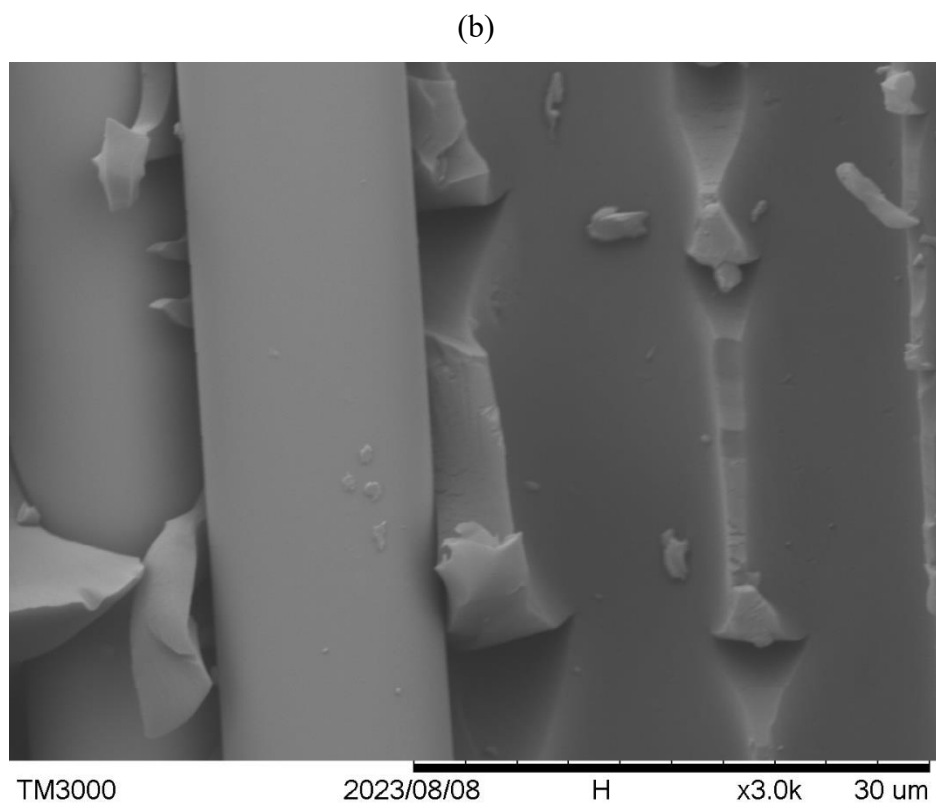
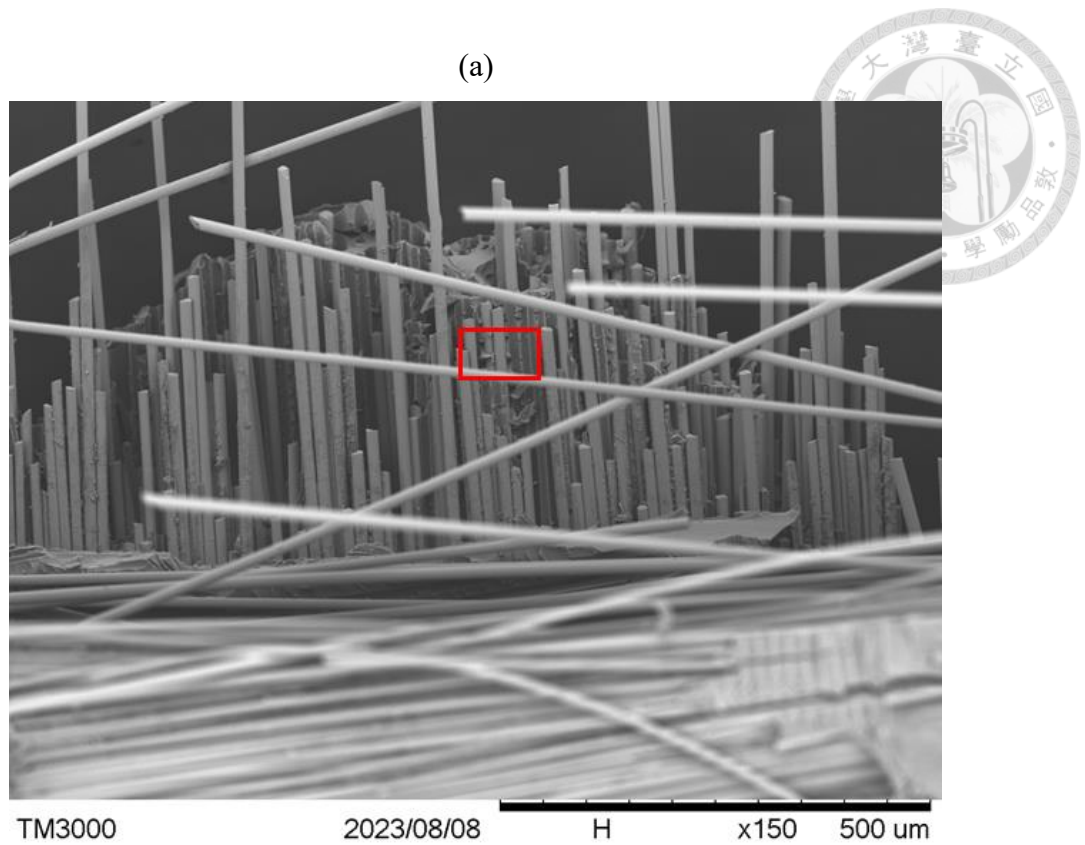


圖 5.55 S2N8 浸泡熱水 75 天後拉伸脫層面樹脂片狀裂開被拉起：(a)放大倍率 150 倍；(b)放大倍率 3000 倍



5.3.4 老化監測總結

試片升溫導致頻譜劈裂緩和。高溫低濕處理對試片的影響甚微。

濕熱老化電阻監測有 2 階段變化。第一，浸泡熱水在前 4 天顯著頻譜往長波長飄移、電阻上升，之後逐漸穩定，且回室溫後頻譜波形、飄移、電阻皆未恢復為浸泡熱水前的狀態；對應強度變化，浸泡熱水 4 天後強度顯著下降，浸泡熱水 30 天與 75 天僅比浸泡熱水 4 天些許下降。第二，浸泡熱水 30、75 天後降溫期間電阻上升一致，但浸泡熱水 4 天較無明顯變化，類似高溫低濕後降溫；對應強度變化，浸泡熱水 30 天與 75 天比浸泡熱水 4 天些許下降。以上 2 種不同階段的電阻變化皆與強度有所關聯。表示電阻有感測溫濕老化發展的潛力。

將浸泡熱水的試片再次進行乾燥處理，頻譜波形、飄移、電阻會逐漸靠近浸泡熱水前的狀態，但不會完全恢復，強度也會些許恢復。

5.4 內埋碳纖維紙對電阻監測的幫助

5.4.1 不同處理期間的電阻變化

放置於乾燥箱的試片，電阻逐漸下降，趨於穩定，25 天下降約 4%，如圖 5.49。與一般試片相近。其餘試片置於附錄，部分試片電阻跳動，於 25 日固定存放方式與位置後較為穩定。

取充分乾燥的 4 片試片進行升溫至 60°C，其中 2 片上升約 4%，1 片下降，然皆約 10 分鐘達穩定，如圖 5.50。

將升溫的 4 片試片其中 2 片進行高溫低濕 30 天處理。期間，S5N8 大致上維持。S5N5 持續下降後趨於穩定，共下降了 16%，如圖 5.51。接著進行降溫，不同於一般試片電阻上升，S5N8 逐漸下降，降了 1.5%，S5N5 則是在一開始發生了陡降，最後持穩，比降溫前下降了 4%，如圖 5.52。

將升溫的 4 片試片另外 2 片進行浸泡熱水 30 天處理。第一天內 S5N3 電阻上升，然 S5N6 卻是電阻下降，如圖 5.53(左)。之後兩者大致上都維持著電阻上升的趨勢，上升了約 30%，圖 5.53(右)。類似於一般試片電阻上升，但沒趨於穩定。至於浸泡熱水後的降溫，兩試片皆電阻下降，約 20%，如圖 5.54。這不同於一般試片電阻上升，亦比高溫低濕的下降量要來的顯著。

至此結束實驗處理，隔天進行拉伸測試。

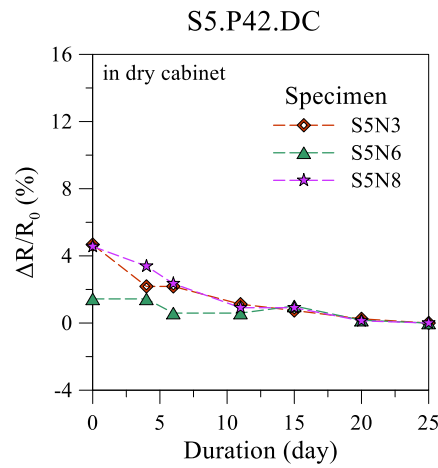


圖 5.56 S5 乾燥期間其中三片試片電阻變化

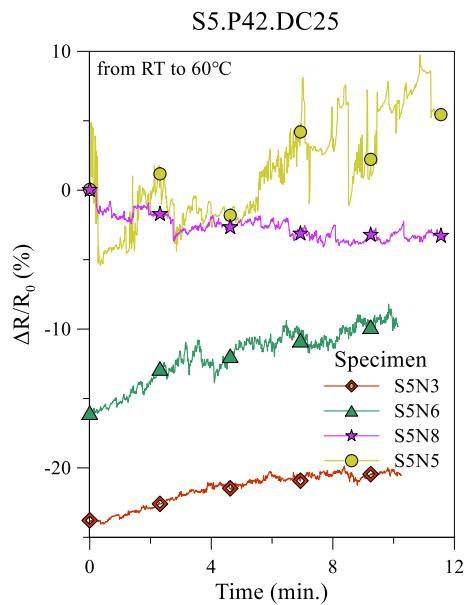


圖 5.57 S5 升溫階段電阻變化

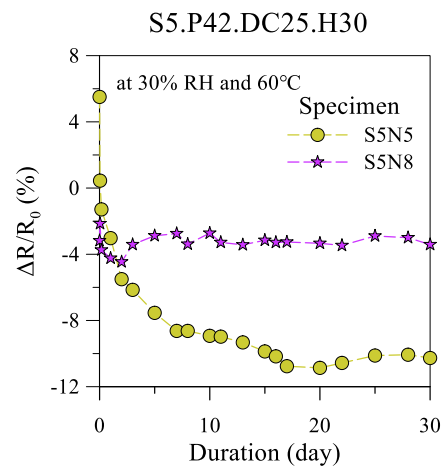
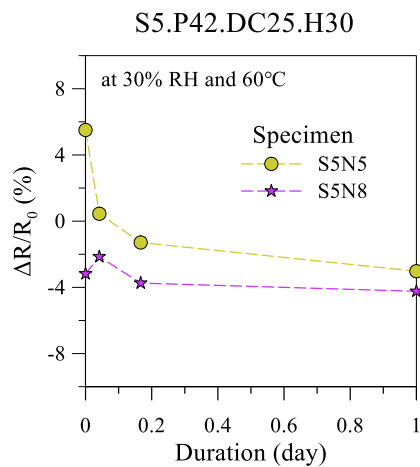


圖 5.58 S5 高溫低濕期間電阻變化：(左)第 1 天內；(右)0 至 30 天

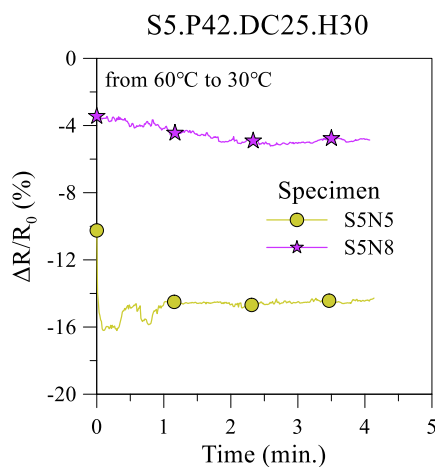


圖 5.59 S5 高溫低濕 30 天後降溫電阻變化

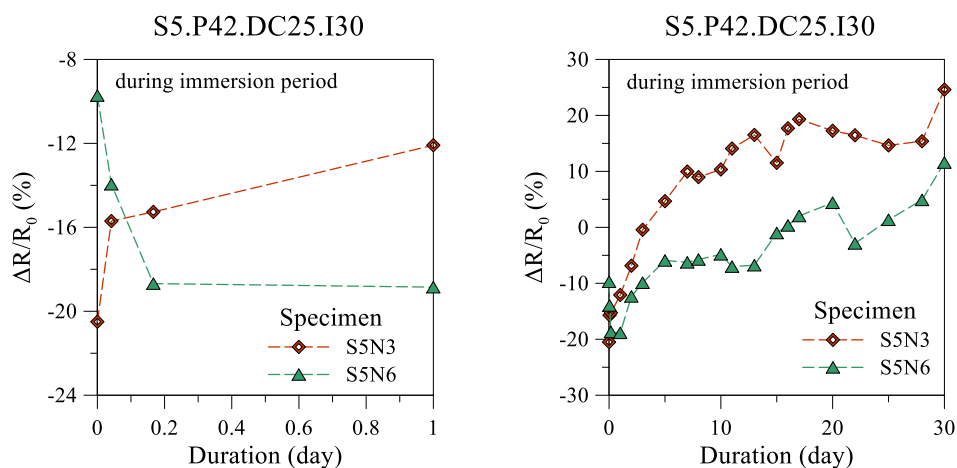


圖 5.60 S5 浸泡熱水期間電阻變化：(左)第 1 天內；(右)0 至 30 天

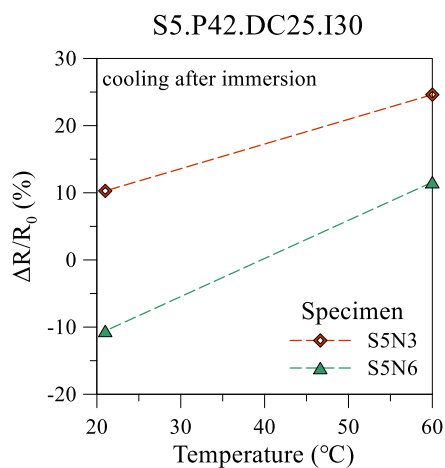


圖 5.61 S5 浸泡熱水 30 天後降溫電阻變化



5.4.2 拉伸測試

除了 S5N2 放置於實驗室環境 10 天便進行拉伸測試，其餘 7 片試片皆在結束實驗處理後隔天進行拉伸測試。此批試片的拉伸強度整理於表 5.10。不同實驗處理對強度方面的影響類似無內埋碳纖維紙的試片，惟高溫低濕 30 天的試片強度降低了 9.67%，可能是不同試片既有的離散度造成。

電阻變化方面，最先開始實驗的 S5N2 在負載至 4500 N 前卸載電阻逐漸降低，如圖 5.55。為排除通電造成的影響，其餘 7 片試片在開始加載前先通電 10 分鐘，然而電阻皆持續上升，不見其趨於穩定，如圖 5.56(左)。另外浸泡熱水 30 天的試片有大量雜訊，如圖 5.57，或許與銅箔與試片本體的交介面濕熱老化有關。

比較循環拉伸期間的電阻變化，撇除浸泡熱水 30 天的試片有大量雜訊，其餘試片皆在 4500-5500 N 後卸載電阻變化的斜率明顯增加，且加載階段的電阻變化明顯分為三段，同 2.2.6 節所述。

表 5.10 S5 含碳纖維紙試片拉伸強度

實驗類別	試片	個別強度 (N)	平均強度 (N)	變異係數 (%)	與僅乾燥處理組 的差異(%)
於實驗室10天	S5N2	7790	7790	0.00	-0.45
僅乾燥處理	S5N1	8006	7825	7.58	
	S5N4	8444			
	S5N7	7025			
高溫低濕30天	S5N5	7016	7069	0.74	-9.67
	S5N8	7121			
浸泡熱水30天	S5N3	5006	5053	0.94	-35.43
	S5N6	5100			

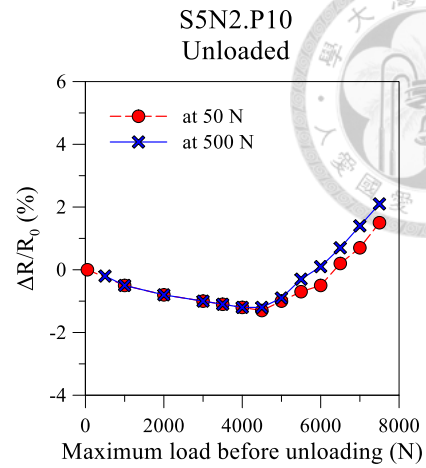
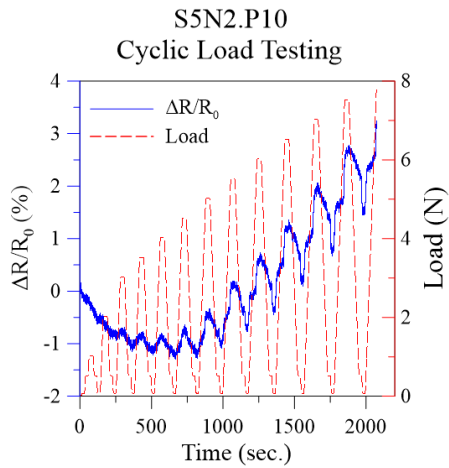


圖 5.62 S5N2 循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載

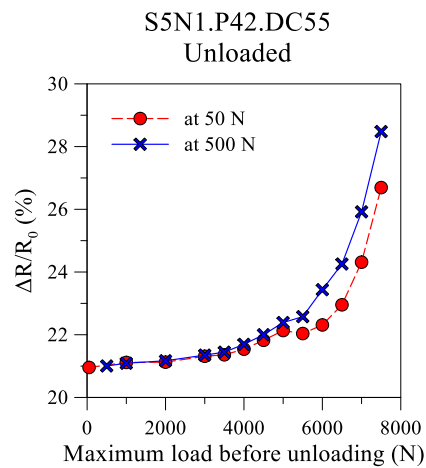
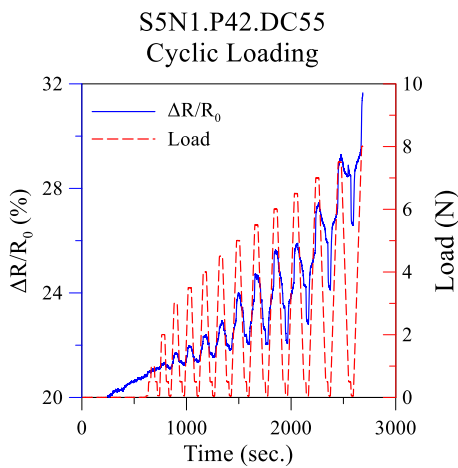


圖 5.63 S5N1 乾燥後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載

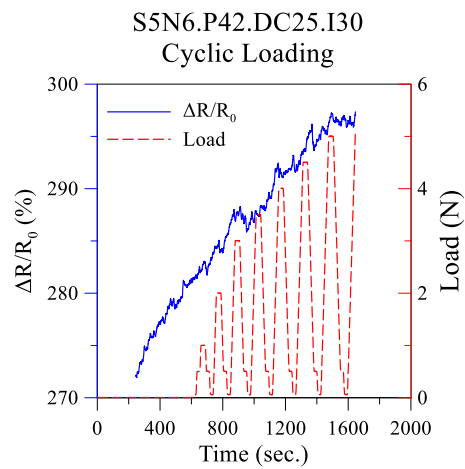
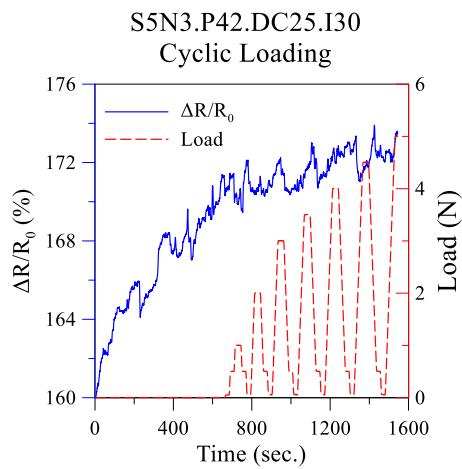


圖 5.64 (左)S5N3 (右)S5N6 浸泡熱水 30 天後循環拉伸電阻變化

5.4.3 內埋碳纖維紙試片總結

綜觀此批整套實驗可以發現，不同試片在多數不同的處理階段中展現的電阻變化並不一致，推測與內埋的碳纖維紙本身分佈不均有關。

內埋碳纖維會有不同於一般試片的電阻變化：循環拉伸時電阻可以明顯看到裂縫重新打開、彈性變形、新的裂縫累積三階段的變化、浸泡熱水期間電阻上升後不見穩定跡象、後降溫階段電阻下降。



第六章 結論與未來展望



本研究發現，浸泡熱水期間以及浸泡熱水後降溫期間的電阻變化，能反映出玻纖複材的濕熱老化程度。且電阻也偵測到浸泡熱水後試片不可逆的變化。另外將試片內埋碳纖維紙，有與一般試片不同的電阻變化。

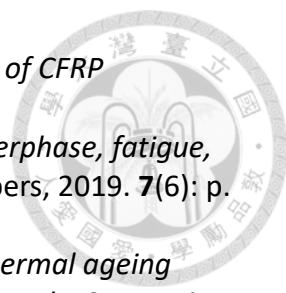
未來能以浸泡熱水中短天期為主，進行各種天數的實驗，建立電阻變化與強度的關係。也可有更多的實驗驗證內埋碳纖維紙試片的電阻變化，或許有助於濕熱老化的監測。但同一種實驗應有 3 片以上的試片數據，使資料更精確。

有些泡水後的試片很可惜的在夾持後電阻大幅上升且有大量雜訊，未來應增加內埋銅箔的伸入長度，並使 MTS 的夾頭夾住部分銅箔，以確保銅箔與試片本體緊密接觸。另外也可進行老化後不同負載型式的測試，像是疲勞試驗，或許也可偵測到老化後不同負載型式的損傷發展差異。

參考文獻



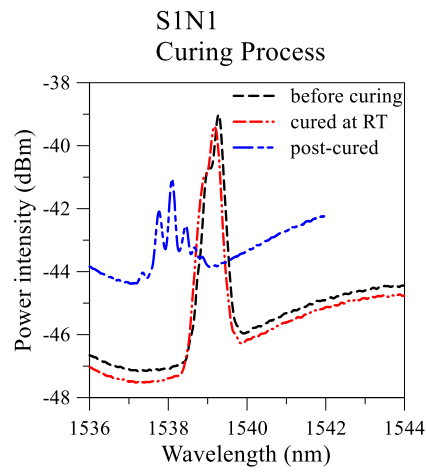
1. Fang, Y., et al., *Monitoring of seawater immersion degradation in glass fibre reinforced polymer composites using quantum dots*. Composites Part B: Engineering, 2017. **112**: p. 93-102.
2. Prusty, R.K., D.K. Rathore, and B.C. Ray, *Water-induced degradations in MWCNT embedded glass fiber/epoxy composites: An emphasis on aging temperature*. Journal of Applied Polymer Science, 2018. **135**(11): p. 45987.
3. Boisseau, A., P. Davies, and F. Thiebaud, *Sea water ageing of composites for ocean energy conversion systems: influence of glass fibre type on static behaviour*. Applied Composite Materials, 2012. **19**: p. 459-473.
4. Hsieh, T., et al., *The effect of carbon nanotubes on the fracture toughness and fatigue performance of a thermosetting epoxy polymer*. Journal of Materials Science, 2011. **46**: p. 7525-7535.
5. Diamanti, K. and C. Soutis, *Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures*. Progress in Aerospace Sciences, 2010. **46**(8): p. 342-352.
6. Cai, J., et al., *Structural health monitoring for composite materials*, in *Composites and their applications*. 2012, IntechOpen.
7. Giurgiutiu, V., *Structural health monitoring of aerospace composites*. 2015.
8. Buggisch, C., et al., *Strain sensing in GFRP via fully integrated carbon nanotube epoxy film sensors*. Composites Part C: Open Access, 2021. **6**: p. 100191.
9. Moy, P. and F. Karasz, *Epoxy-water interactions*. Polymer Engineering & Science, 1980. **20**(4): p. 315-319.
10. Zhang, Y., R. Adams, and L.F. da Silva, *Absorption and glass transition temperature of adhesives exposed to water and toluene*. International Journal of Adhesion and adhesives, 2014. **50**: p. 85-92.
11. Viana, G., et al., *A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(5): p. 488-501.
12. Budhe, S., et al., *An updated review of adhesively bonded joints in composite materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **72**: p. 30-42.
13. Al-Sabagh, A., et al., *Monitoring moisture damage propagation in GFRP composites using carbon nanoparticles*. Polymers, 2017. **9**(3): p. 94.
14. Kumagal, S. and N. Yoshimura, *Impacts of thermal aging and water absorption on the surface electrical and chemical properties of cycloaliphatic epoxy resin*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000. **7**(3): p. 424-431.
15. Bouhamed, A., et al., *Assessing the electrical behaviour of MWCNTs/epoxy nanocomposite for strain sensing*. Composites Part B: Engineering, 2017. **128**: p. 91-99.
16. Katnam, K., et al., *Characterisation of moisture-dependent cohesive zone properties for adhesively bonded joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(16): p. 3105-3119.
17. Xu, D., et al., *Damage mode identification of adhesive composite joints under hygrothermal environment using acoustic emission and machine learning*. Composite structures, 2019. **211**: p. 351-363.

- 
18. Meng, M., et al., *Effects of hygrothermal stress on the failure of CFRP composites*. Composite Structures, 2015. **133**: p. 1024-1035.
 19. Gibhardt, D., et al., *Effects of hygrothermal ageing on the interphase, fatigue, and mechanical properties of glass fibre reinforced epoxy*. Fibers, 2019. **7**(6): p. 55.
 20. Karalekas, D., J. Cugnoni, and J. Botsis, *Monitoring of hygrothermal ageing effects in an epoxy resin using FBG sensor: A methodological study*. Composites science and technology, 2009. **69**(3-4): p. 507-514.
 21. Dewimille, B. and A. Bunsell, *Accelerated ageing of a glass fibre-reinforced epoxy resin in water*. Composites, 1983. **14**(1): p. 35-40.
 22. Wang, Y., et al., *Thermal-ageing characteristics of dry-type transformer epoxy composite insulation*. High Performance Polymers, 2020. **32**(7): p. 741-752.
 23. Eftekhari, M. and A. Fatemi, *Tensile behavior of thermoplastic composites including temperature, moisture, and hygrothermal effects*. Polymer Testing, 2016. **51**: p. 151-164.
 24. Jiang, X., et al., *Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. **57**: p. 49-58.
 25. Krauklis, A.E., A.I. Gagani, and A.T. Echtermeyer, *Hygrothermal aging of amine epoxy: reversible static and fatigue properties*. Open Engineering, 2018. **8**(1): p. 447-454.
 26. Carbas, R., et al., *Effect of post-cure on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**(23): p. 2542-2557.
 27. Barbosa, A., L. Da Silva, and A. Öchsner, *Hygrothermal aging of an adhesive reinforced with microparticles of cork*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015. **29**(16): p. 1714-1732.
 28. Obitayo, W. and T. Liu, *A review: Carbon nanotube-based piezoresistive strain sensors*. Journal of Sensors, 2012. **2012**.
 29. Frank, S., et al., *Carbon nanotube quantum resistors*. science, 1998. **280**(5370): p. 1744-1746.
 30. Bachtold, A., et al., *Aharonov–Bohm oscillations in carbon nanotubes*. Nature, 1999. **397**(6721): p. 673-675.
 31. Berger, C., et al., *Multiwalled carbon nanotubes are ballistic conductors at room temperature*. Applied Physics A, 2002. **74**: p. 363-365.
 32. Zamkov, M., et al., *Probing the intrinsic conductivity of multiwalled carbon nanotubes*. Applied physics letters, 2006. **89**(9): p. 093111.
 33. Kirkpatrick, S., *Percolation and conduction*. Reviews of modern physics, 1973. **45**(4): p. 574.
 34. Gojny, F.H., et al., *Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites*. Polymer, 2006. **47**(6): p. 2036-2045.
 35. Wang, Y., et al., *Piezoresistive response of carbon nanotube composite film under laterally compressive strain*. Sensors and Actuators A: Physical, 2018. **273**: p. 140-146.
 36. Xiao, T., et al., *3D printing of flexible strain sensor array based on UV-curable*

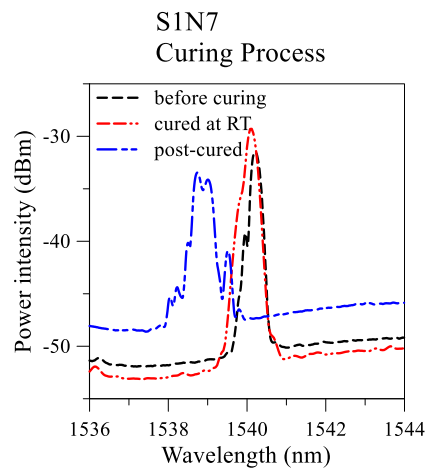
- 
- multiwalled carbon nanotube/elastomer composite*. Advanced Materials Technologies, 2021. **6**(1): p. 2000745.
37. Tang, Z.-H., et al., *Comprehensive evaluation of the piezoresistive behavior of carbon nanotube-based composite strain sensors*. Composites Science and Technology, 2021. **208**: p. 108761.
 38. Bregar, T., et al., *Carbon nanotube embedded adhesives for real-time monitoring of adhesion failure in high performance adhesively bonded joints*. Scientific Reports, 2020. **10**(1): p. 16833.
 39. Sanli, A., et al., *Piezoresistive performance characterization of strain sensitive multi-walled carbon nanotube-epoxy nanocomposites*. Sensors and Actuators A: Physical, 2017. **254**: p. 61-68.
 40. Shen, J., et al., *Pressure and temperature induced electrical resistance change in nano-carbon/epoxy composites*. Composites science and technology, 2015. **115**: p. 1-8.
 41. Tian, C.J., et al., *Smart properties of carbon nanotube-epoxy composites*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, 2020. **234**(11): p. 1409-1416.
 42. Barberio, M., et al., *Electric resistivity of multi-walled carbon nanotubes at high temperatures*. Surface science, 2007. **601**(13): p. 2814-2818.
 43. Mohiuddin, M. and S. Van Hoa, *Electrical resistance of CNT-PEEK composites under compression at different temperatures*. Nanoscale research letters, 2011. **6**(1): p. 1-5.
 44. Li, Q., et al., *Temperature dependence of the electrical properties of the carbon nanotube/polymer composites*. Express Polym Lett, 2009. **3**(12): p. 769-777.
 45. Sung, D., et al., *Ab initio study of the effect of water adsorption on the carbon nanotube field-effect transistor*. Applied Physics Letters, 2006. **89**(24): p. 243110.
 46. Li, J., et al., *Carbon nanotube sensors for gas and organic vapor detection*. Nano letters, 2003. **3**(7): p. 929-933.
 47. Zhao, J., et al., *Gas molecule adsorption in carbon nanotubes and nanotube bundles*. Nanotechnology, 2002. **13**(2): p. 195.
 48. Zahab, A., et al., *Water-vapor effect on the electrical conductivity of a single-walled carbon nanotube mat*. Physical Review B, 2000. **62**(15): p. 10000.
 49. Sanli, A., et al. *Study of the humidity effect on the electrical impedance of MWCNTs/epoxy nanocomposites*. in *Proceedings of the Conference: 9th International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, Germany*. 2016.
 50. Zhang, H., E. Bilotti, and T. Peijs, *The use of carbon nanotubes for damage sensing and structural health monitoring in laminated composites: a review*. Nanocomposites, 2015. **1**(4): p. 167-184.
 51. Thostenson, E.T. and T.-W. Chou, *Real-time in situ sensing of damage evolution in advanced fiber composites using carbon nanotube networks*. Nanotechnology, 2008. **19**(21): p. 215713.
 52. Bian, B., et al., *Thermal-aging characteristics of epoxy/glass fiber composite materials for dry-type air-core reactors*. Polymer Composites, 2021. **42**(8): p. 3773-3785.
 53. Yang, Y., et al., *Electrical Properties and Lifetime Prediction of an Epoxy Composite Insulation Material after Hygrothermal Aging*. Polymers, 2023.

- 
- 15(8): p. 1942.
54. Addanki, S., I.S. Amiri, and P. Yupapin, *Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers*. Results in Physics, 2018. **10**: p. 743-750.
55. 蔡曉信 and 葉名倉. 光纖 (Optical Fiber) . 科學 Online 2009 7 月 29 日 [cited 2023 4 月 19 日]; Available from: <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=2929>.
56. 鼎志電子股份有限公司. *Fiber Optic Types : Multimode and Singlemode*. 2023 [cited 2023 4 月 19 日]; Available from: <https://www.dintek.com.tw/index.php/Articles/Fiber-optic-types-multimode-and-singlemode.html>.
57. 曙曜科技股份有限公司. *Optical Power 光功率*. 2023 [cited 2023 4 月 19 日]; Available from: <https://www.dawnraytech.com.tw/blog/optical-power-introduction/>.
58. 許世昌. 光纖光柵. 科學 Online 2017 7 月 26 日 [cited 2023 4 月 19 日]; Available from: <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=76715>.
59. Murayama, H., et al., *Strain monitoring of a single-lap joint with embedded fiber-optic distributed sensors*. Structural Health Monitoring, 2012. **11**(3): p. 325-344.
60. Othonos, A., *Fiber bragg gratings*. Review of scientific instruments, 1997. **68**(12): p. 4309-4341.
61. Lin, C.-L., *微結構材料的光-機械應用: 1) 光纖布拉格光柵感測器 2) 雷射趨動高分子微感測器*. 2004.
62. Güemes, A., et al., *Structural health monitoring for advanced composite structures: a review*. Journal of Composites Science, 2020. **4**(1): p. 13.
63. Yeager, M., et al., *Assessment of embedded fiber Bragg gratings for structural health monitoring of composites*. Structural Health Monitoring, 2017. **16**(3): p. 262-275.
64. Mieloszyk, M., K. Majewska, and W. Ostachowicz, *Application of embedded fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of complex composite structures for marine applications*. Marine Structures, 2021. **76**: p. 102903.
65. Mieloszyk, M. and W. Ostachowicz, *Moisture contamination detection in adhesive bond using embedded FBG sensors*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017. **84**: p. 1-14.
66. Fan, Z., et al., *Structural health monitoring of metal-to-glass–ceramics penetration during thermal cycling aging using femto-laser inscribed FBG sensors*. Scientific Reports, 2020. **10**(1): p. 12330.
67. Mohanta, S., et al., *Insight into the nondestructive performance evaluation of fiber-reinforced polymer composite laminate immersed in produced water using embedded fiber Bragg grating sensor*. Polymer Composites, 2021. **42**(9): p. 4717-4727.
68. Shin, C.-S. and T.-C. Lin, *Hygrothermal Damage Monitoring of Composite Adhesive Joint Using the Full Spectral Response of Fiber Bragg Grating Sensors*. Polymers, 2022. **14**(3): p. 368.

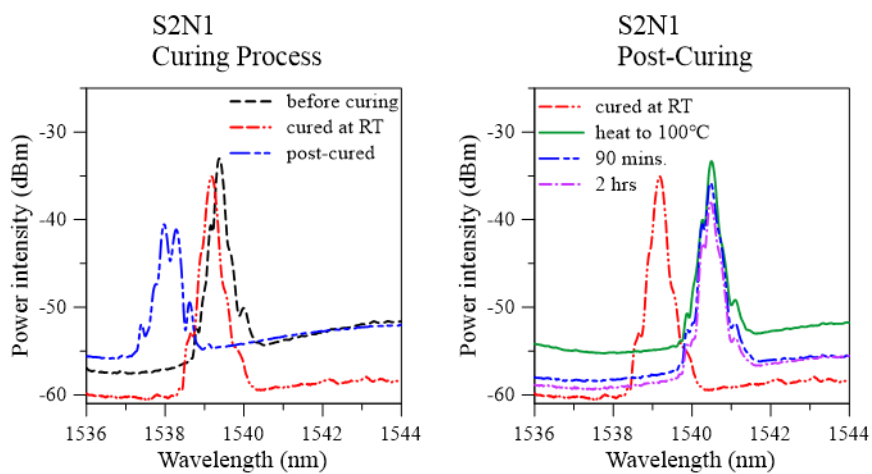
附錄



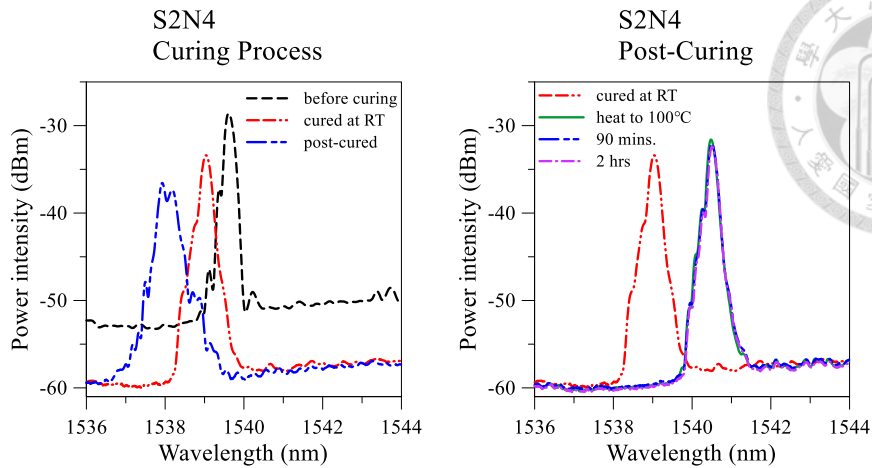
附圖 1 S1N1 常溫固化與後固化後的頻譜變化



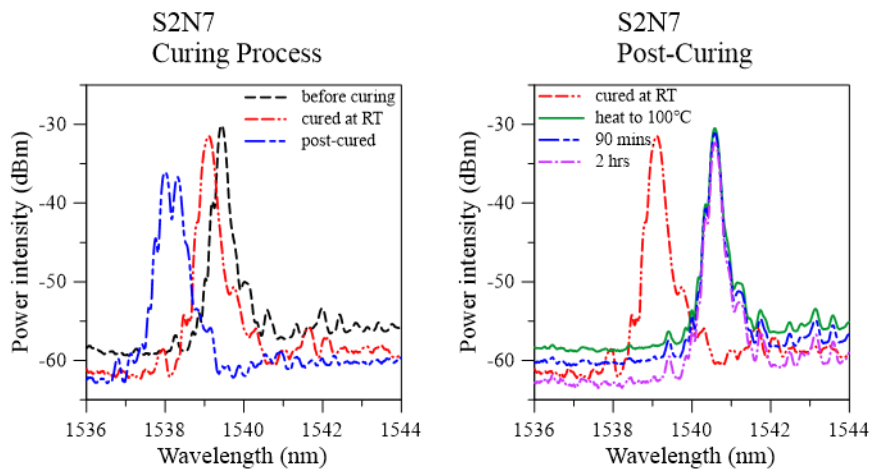
附圖 2 S1N7 常溫固化與後固化後的頻譜變化



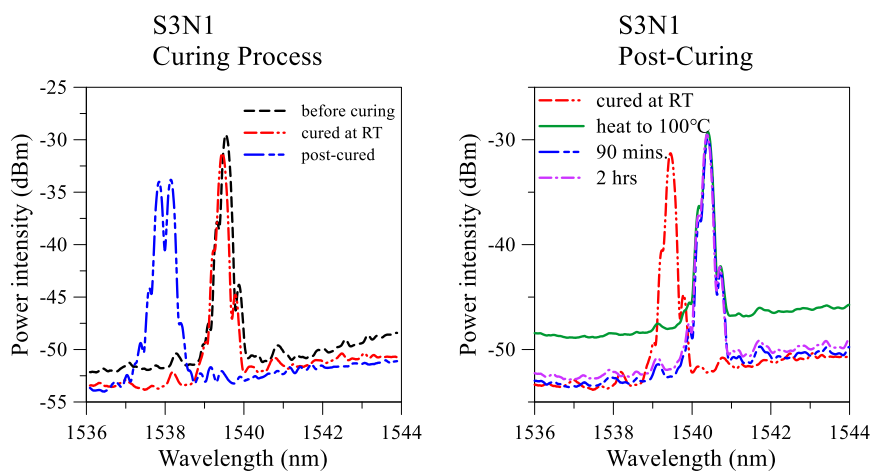
附圖 3 S2N1 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



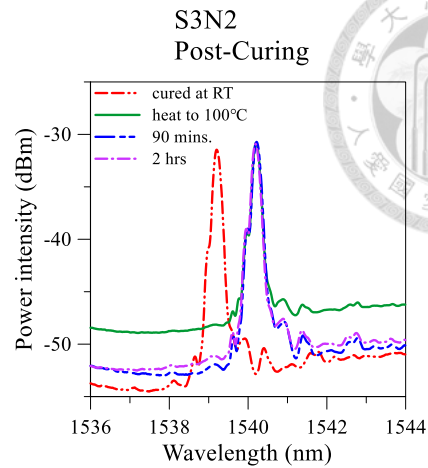
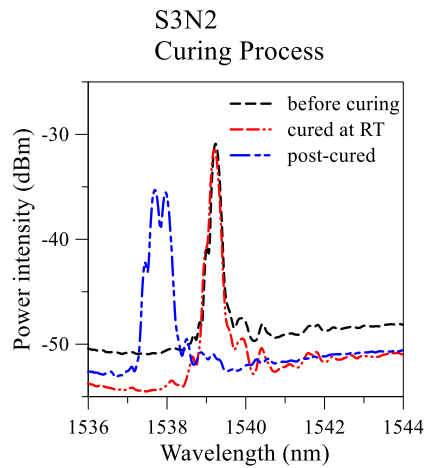
附圖 4 S2N4 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



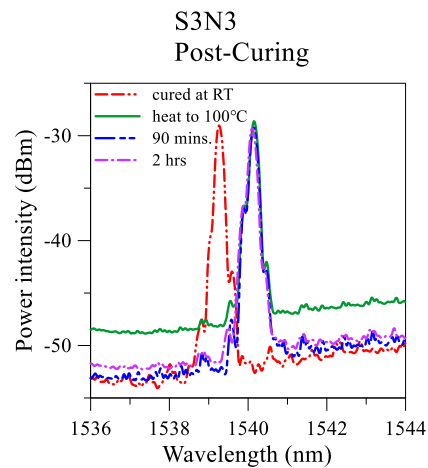
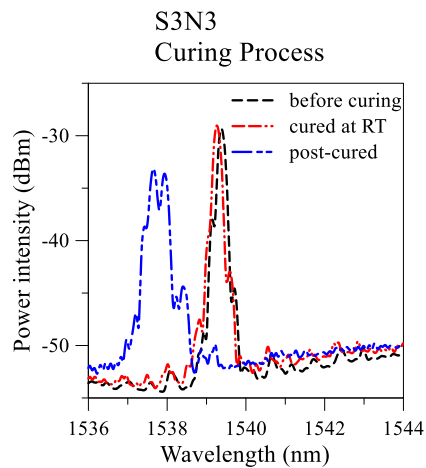
附圖 5 S2N7 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



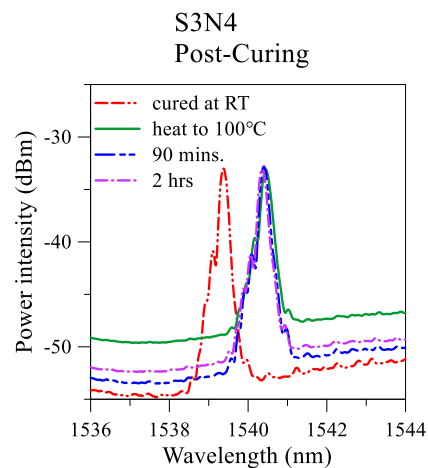
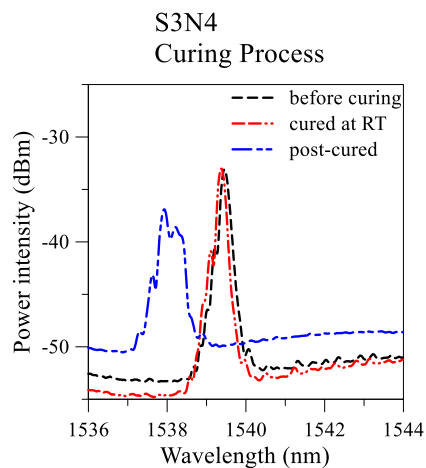
附圖 6 S3N1 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



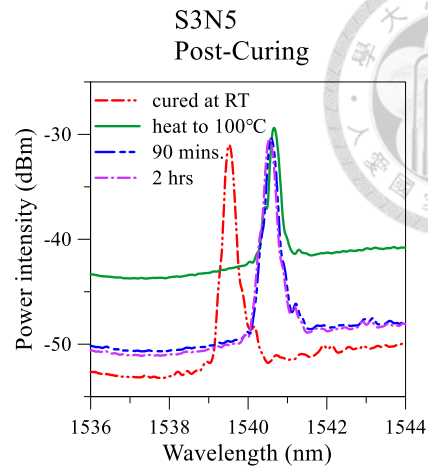
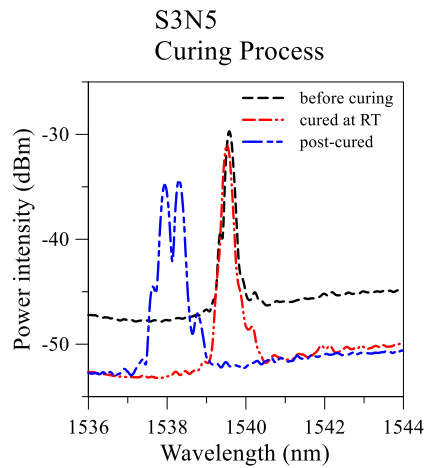
附圖 7 S3N2 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



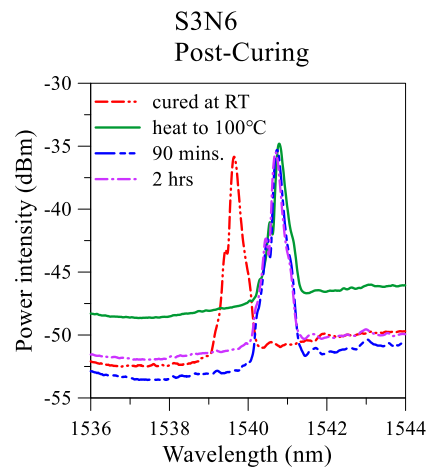
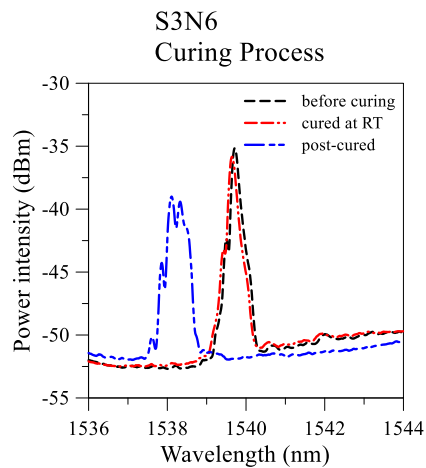
附圖 8 S3N3 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



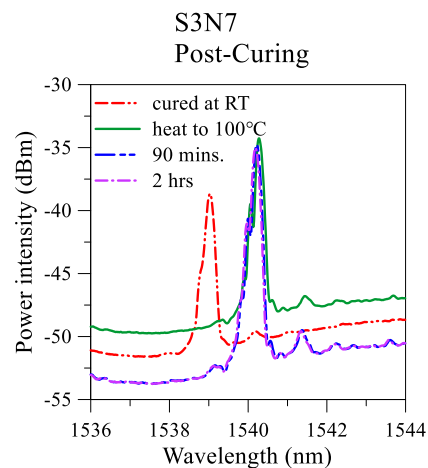
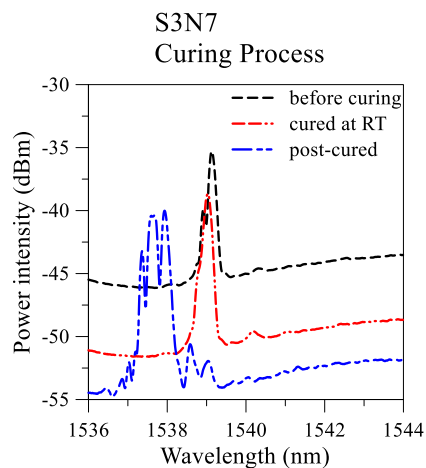
附圖 9 S3N4 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



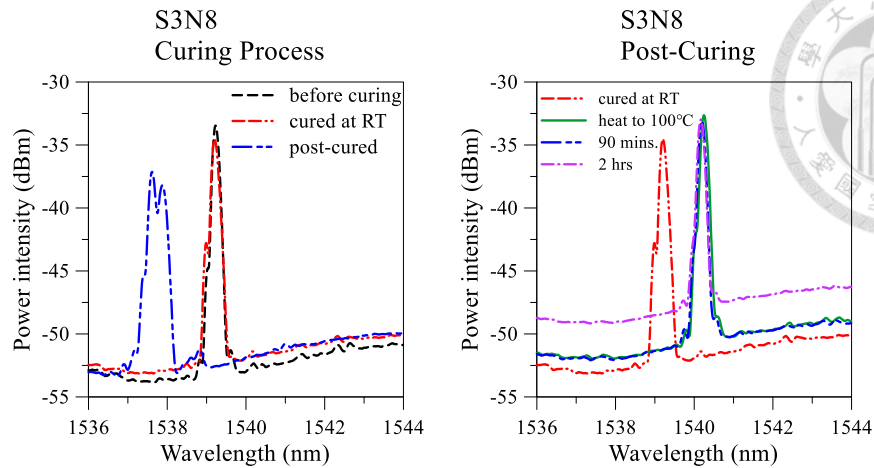
附圖 10 S3N5 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



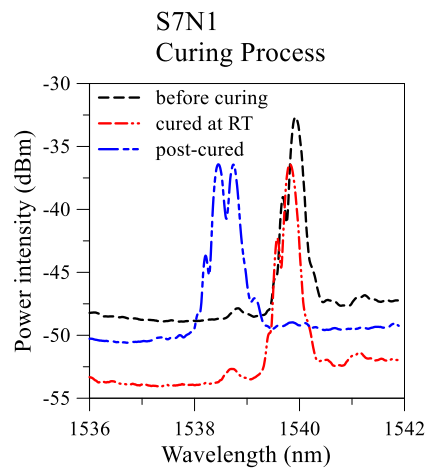
附圖 11 S3N6 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



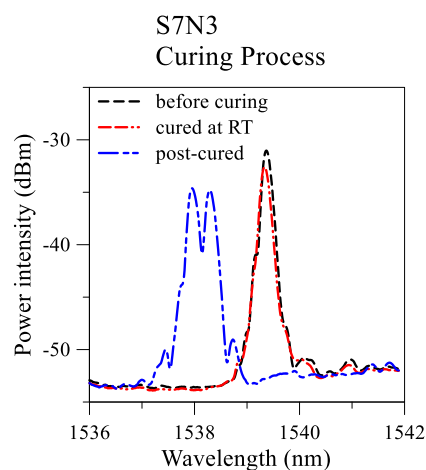
附圖 12 S3N7 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



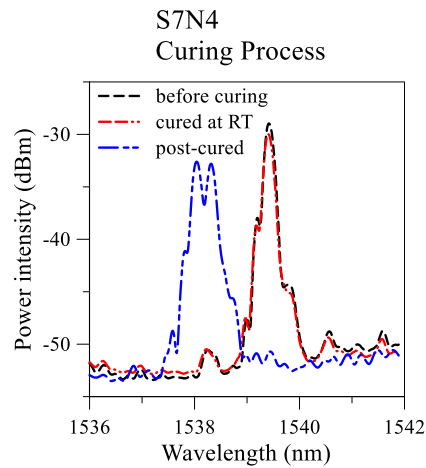
附圖 13 S3N8 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



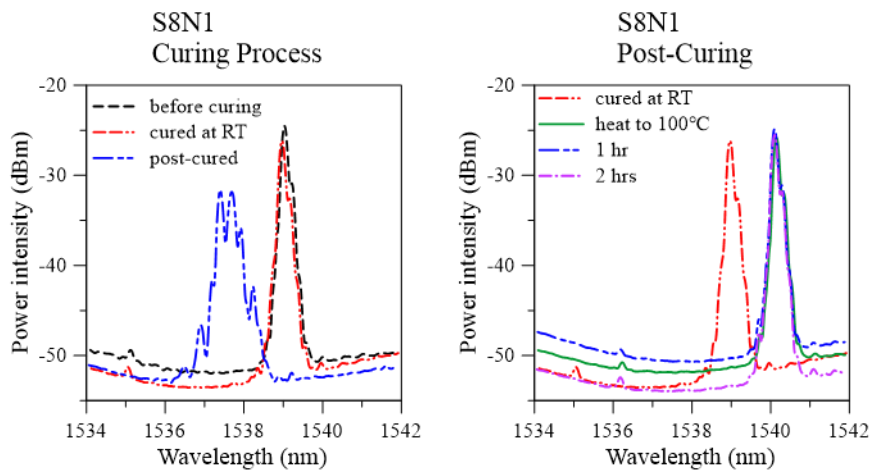
附圖 14 S7N1 常溫固化與後固化後的頻譜變化



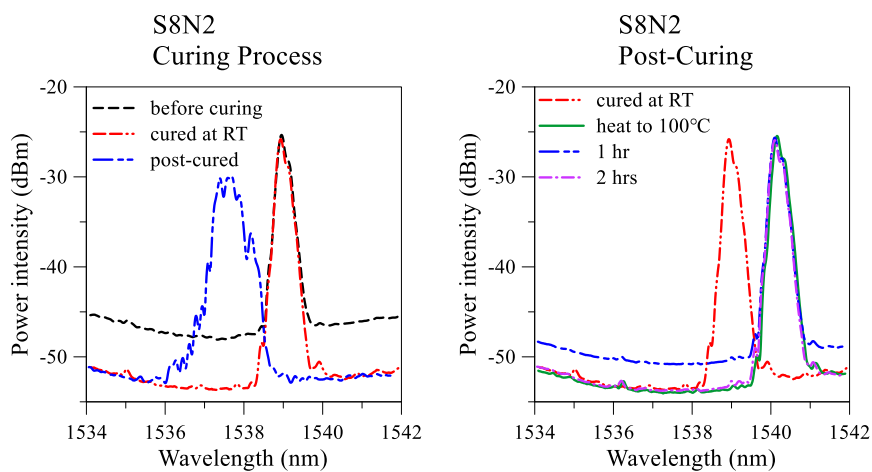
附圖 15 S7N3 常溫固化與後固化後的頻譜變化



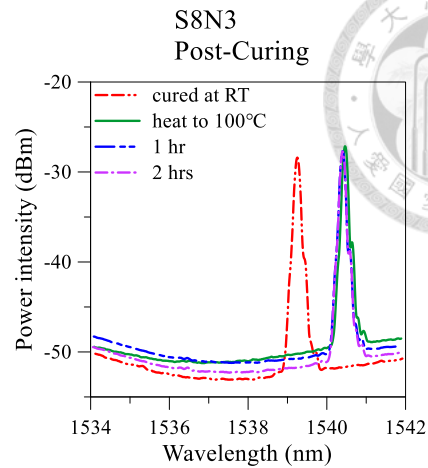
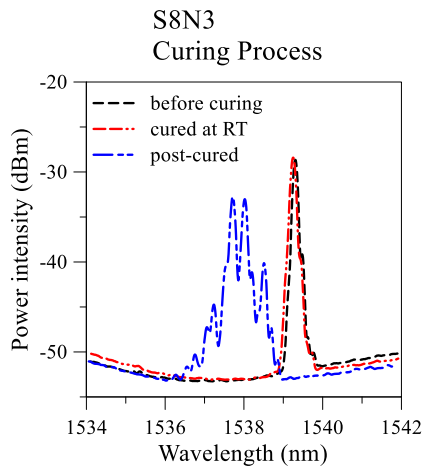
附圖 16 S7N4 常溫固化與後固化後的頻譜變化



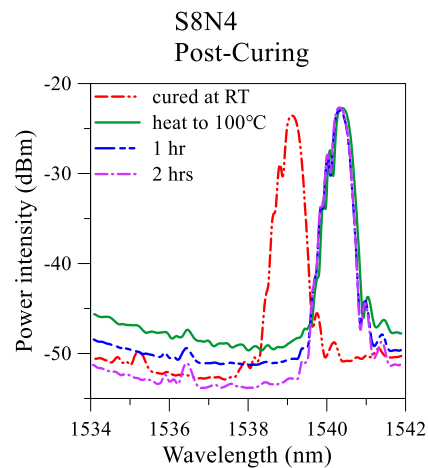
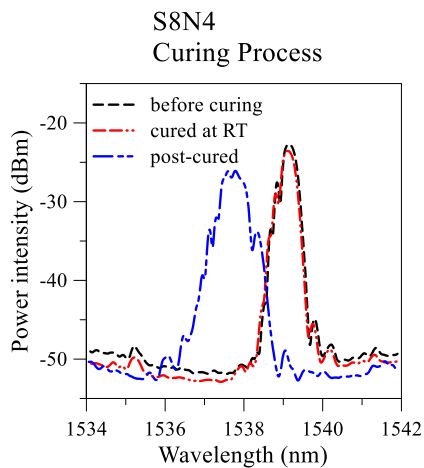
附圖 17 S8N1 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



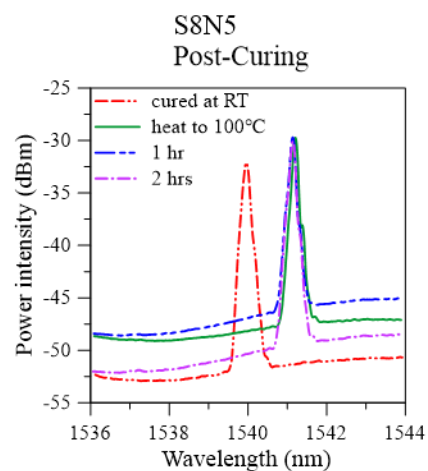
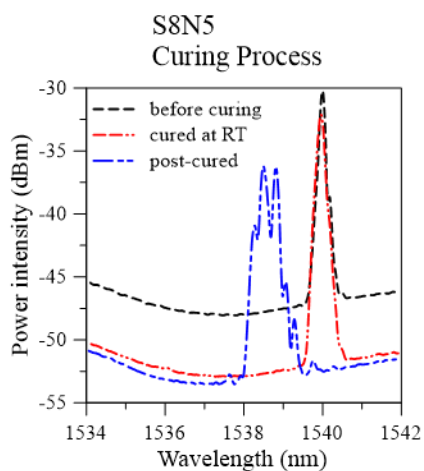
附圖 18 S8N2 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



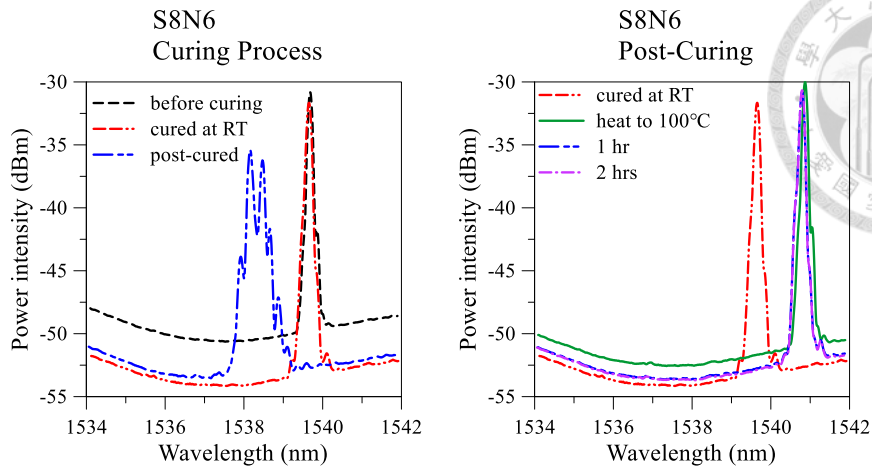
附圖 19 S8N3 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



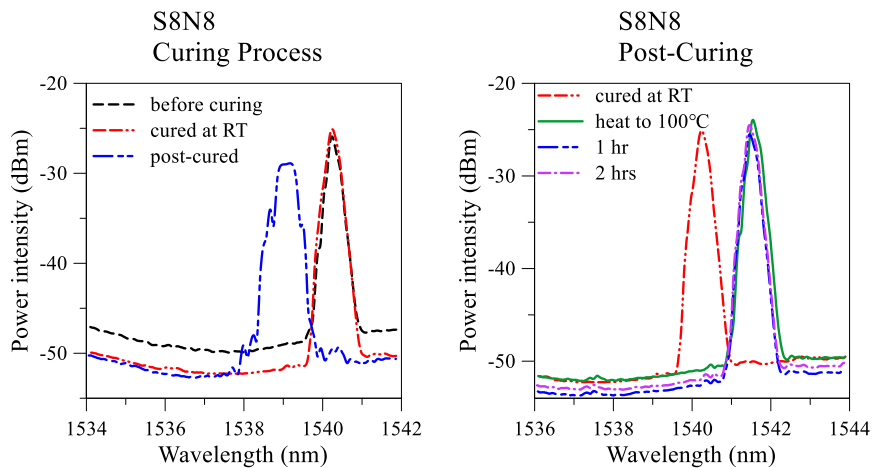
附圖 20 S8N4 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



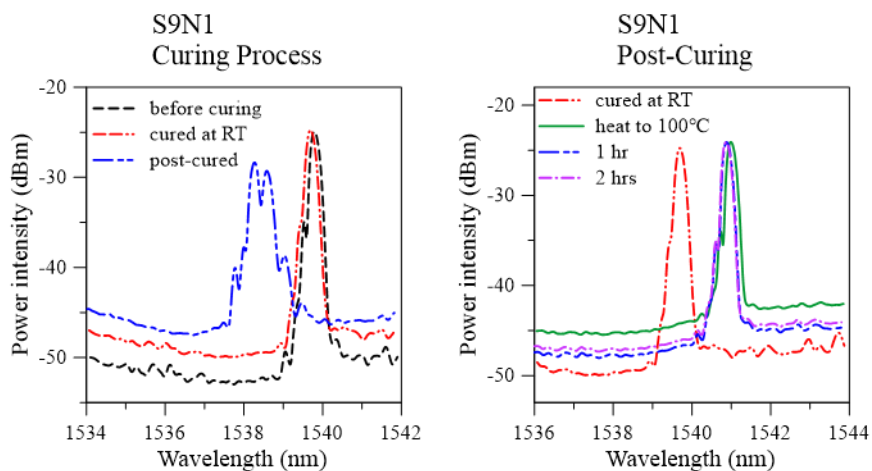
附圖 21 S8N5 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



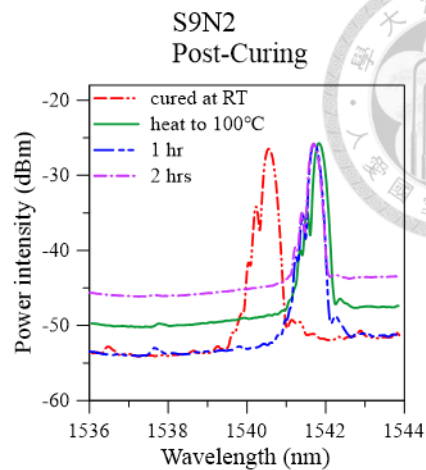
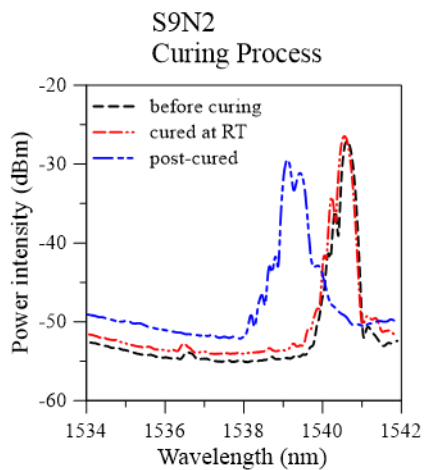
附圖 22 S8N6 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



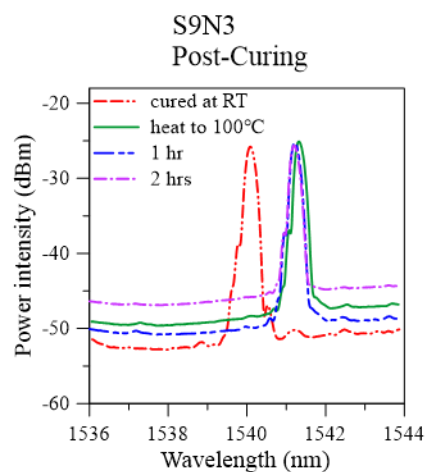
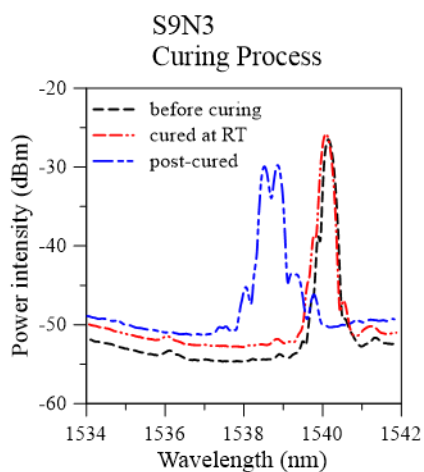
附圖 23 S8N8 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



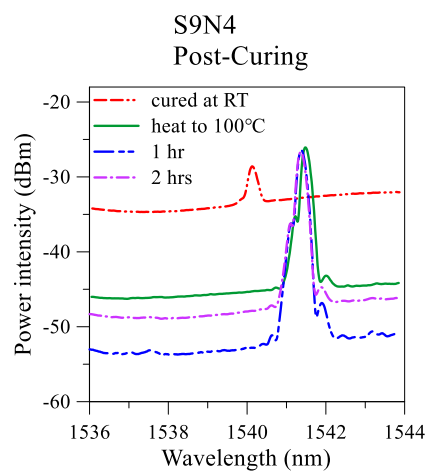
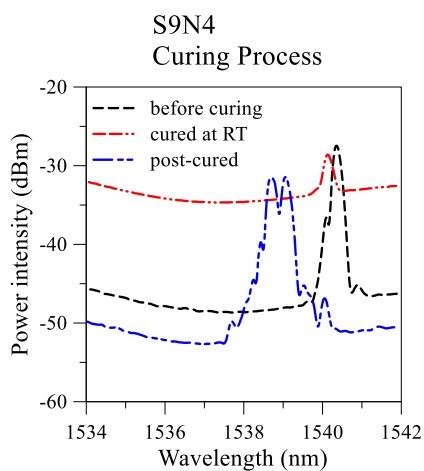
附圖 24 S9N1 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



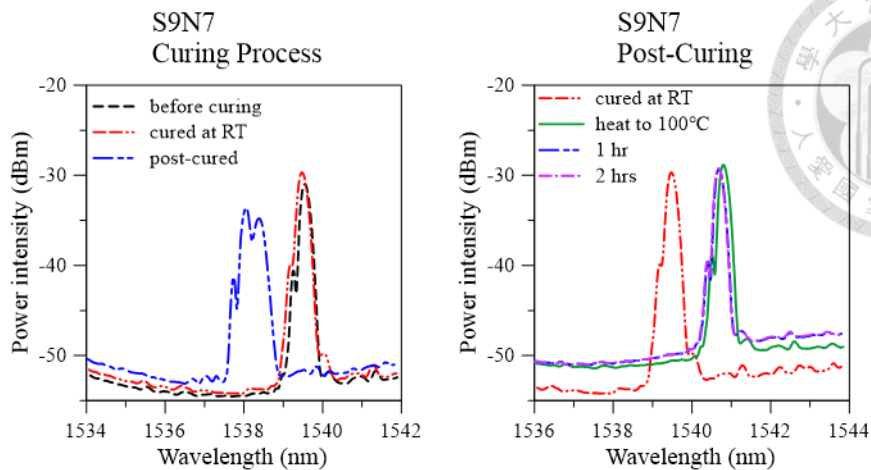
附圖 25 S9N2 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



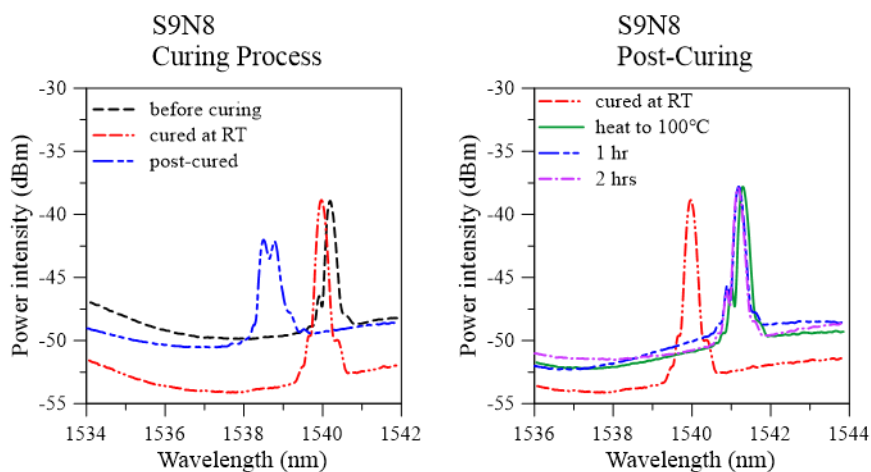
附圖 26 S9N3 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化



附圖 27 S9N4 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化

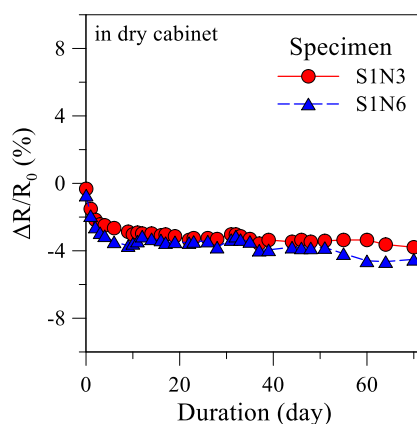


附圖 28 S9N7 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化

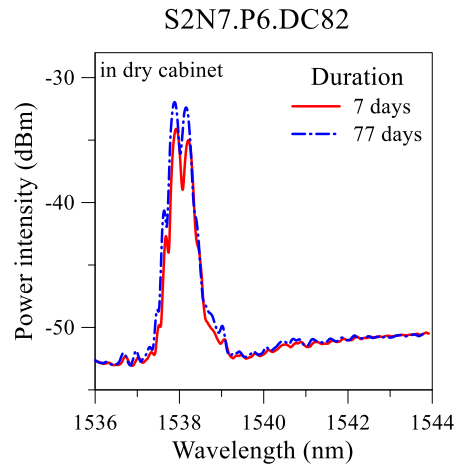


附圖 29 S9N8 固化的不同階段頻譜變化：(左)常溫固化與後固化後的頻譜變化；
(右)後固化期間的頻譜變化

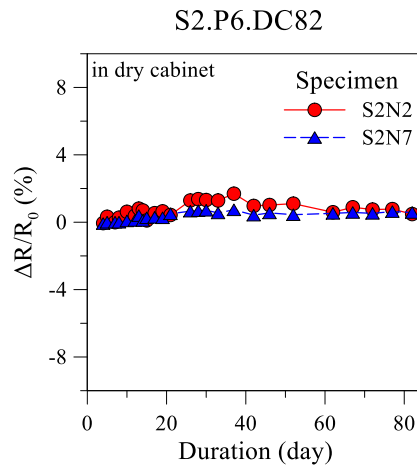
S1.P9.DC70



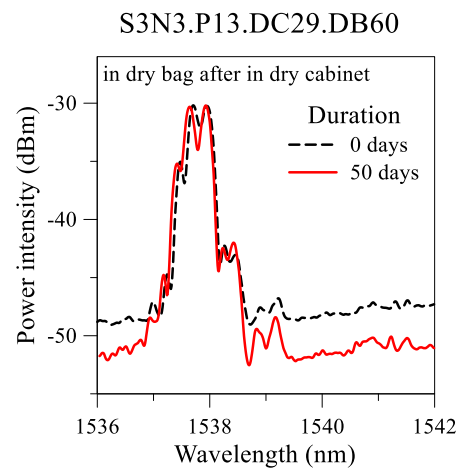
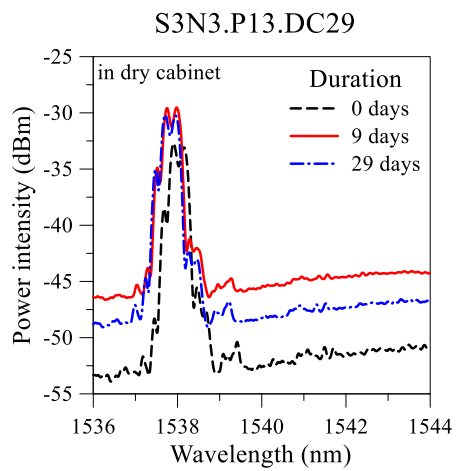
附圖 30 S1 僅乾燥處理組乾燥期間電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 0
天)的電阻為 R_0



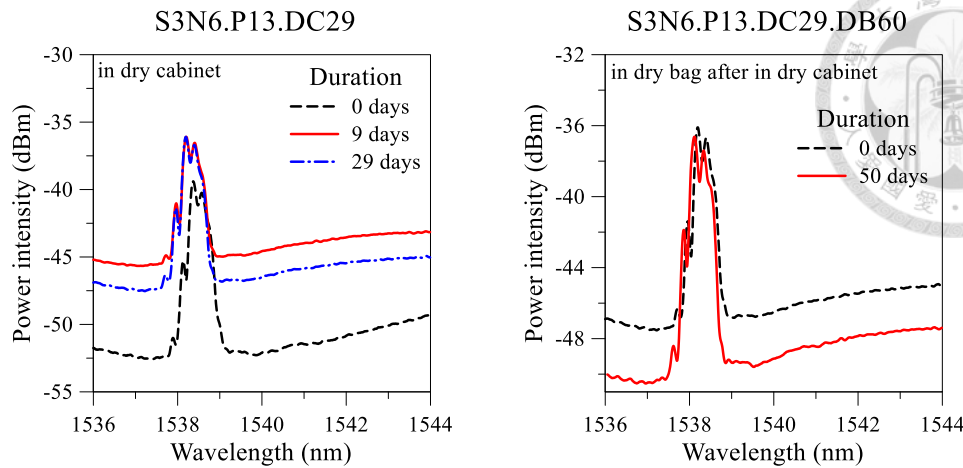
附圖 31 S2N7 乾燥期間頻譜變化



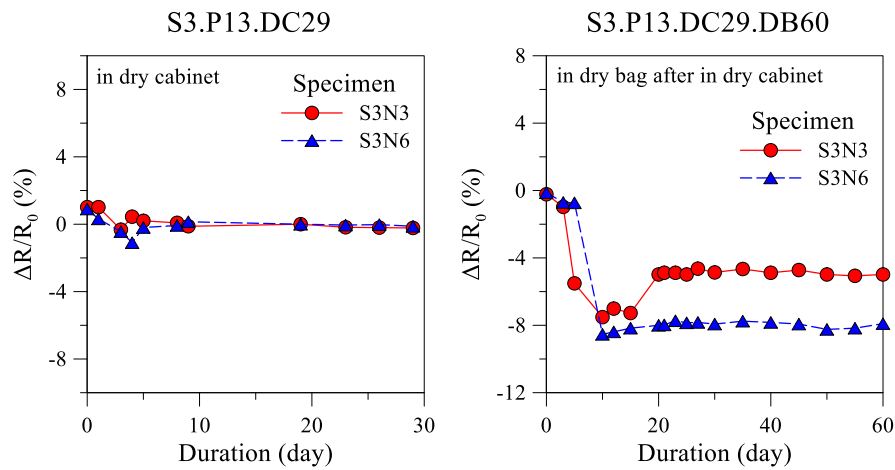
附圖 32 S2 乾燥期間電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 7 天)的電阻為 R_0



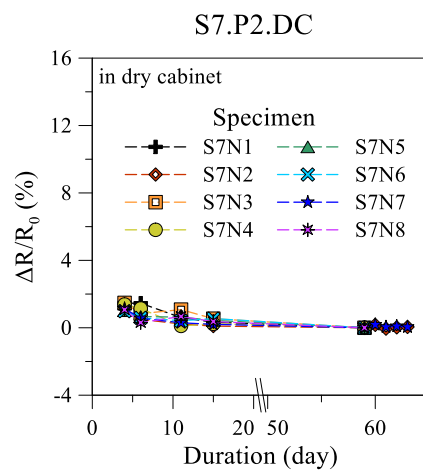
附圖 33 S3N3 乾燥期間頻譜變化：(左)乾燥箱中；(右)乾燥箱 29 天後移至乾燥袋



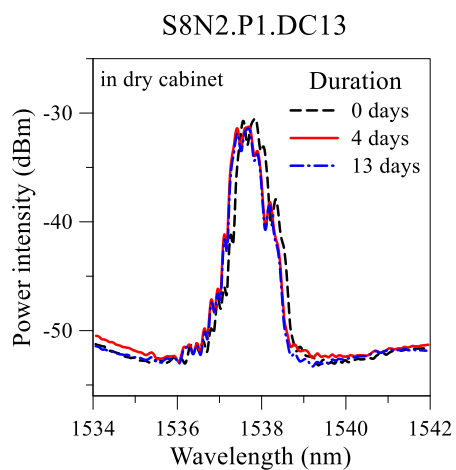
附圖 34 S3N6 乾燥期間頻譜變化：(左)乾燥箱中；(右)乾燥箱 29 天後移至乾燥袋



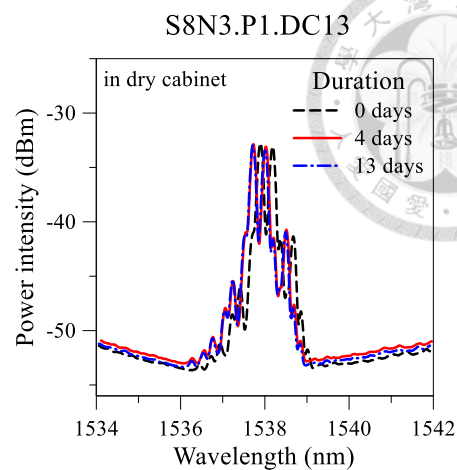
附圖 35 S3 乾燥期間電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 19 天)的電阻為 R_0 ：(左)乾燥箱中；(右)乾燥箱 29 天後移至乾燥袋



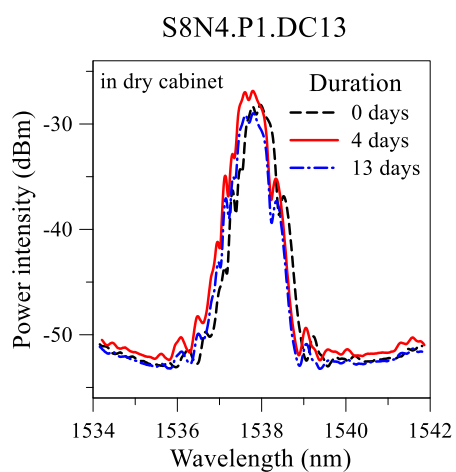
附圖 36 S7 乾燥期間電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 59 天)的電阻為 R_0



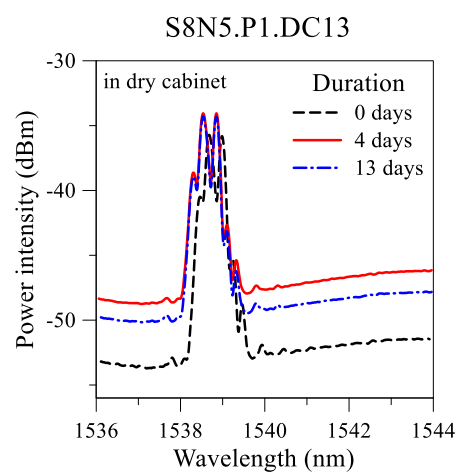
附圖 37 S8N2 乾燥期間頻譜變化



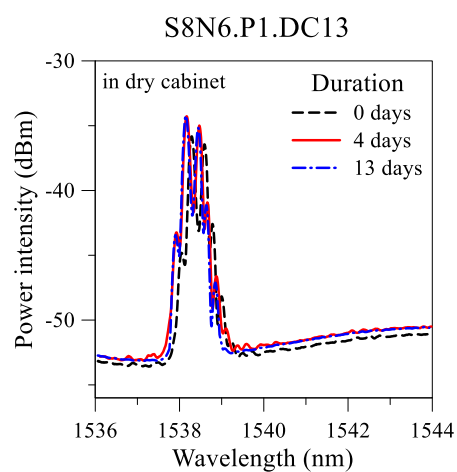
附圖 38 S8N3 乾燥期間頻譜變化



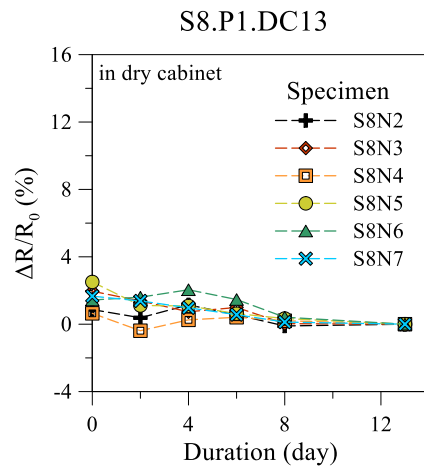
附圖 39 S8N4 乾燥期間頻譜變化



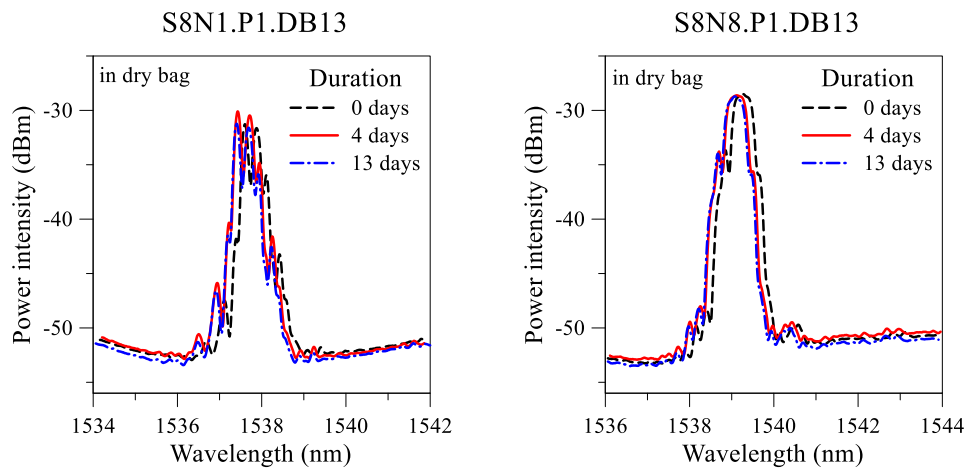
附圖 40 S8N5 乾燥期間頻譜變化



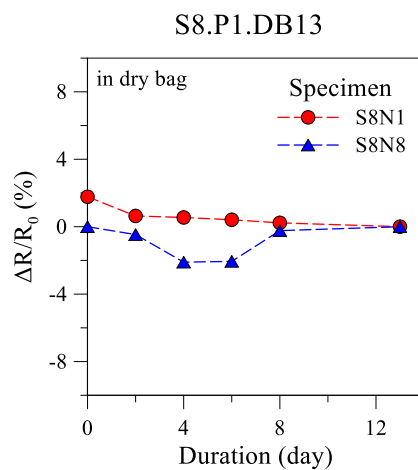
附圖 41 S8N6 乾燥期間頻譜變化



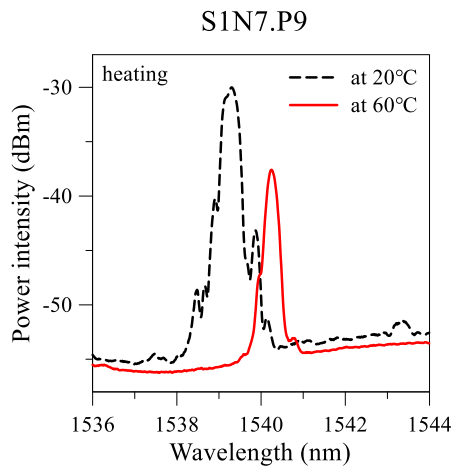
附圖 42 S8 乾燥期間於乾燥箱試片的電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 13 天)的電阻為 R_0



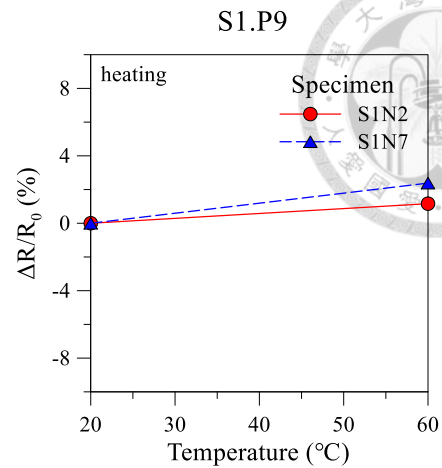
附圖 43 S8 乾燥期間於乾燥袋試片的頻譜變化：(左)S8N1；(右)S8N8



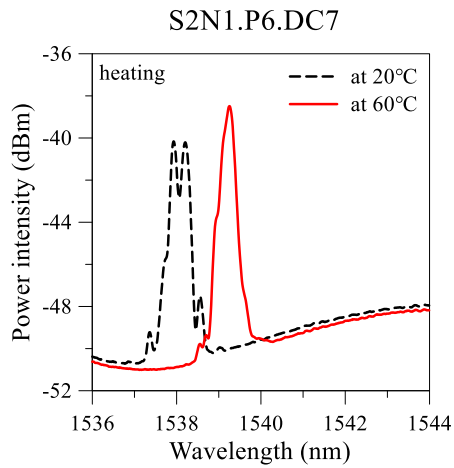
附圖 44 S8 乾燥期間於乾燥袋試片的電阻變化，以同批開始老化實驗當天(乾燥 13 天)的電阻為 R_0



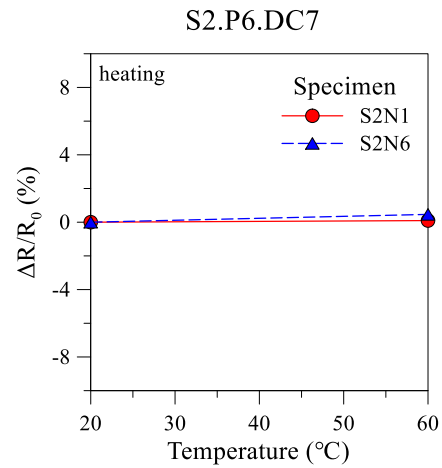
附圖 45 S1N7 升溫頻譜變化



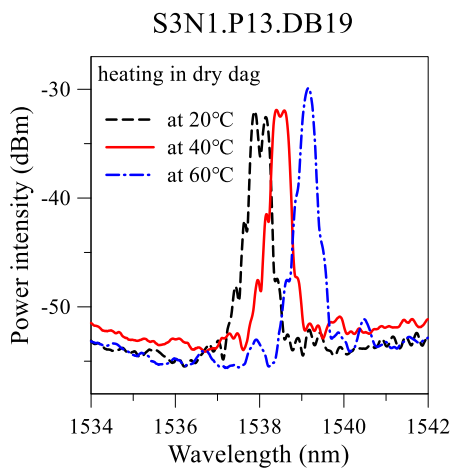
附圖 46 S1 高溫低濕組升溫電阻變化



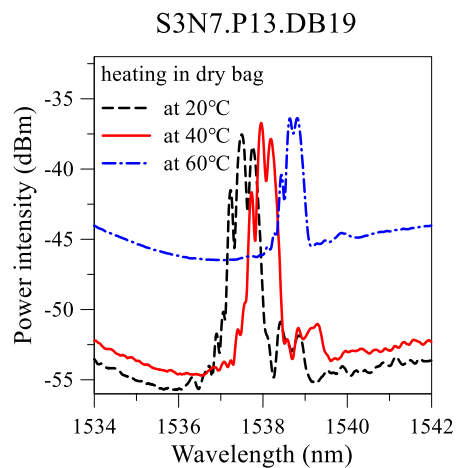
附圖 47 S2N1 升溫頻譜變化



附圖 48 S2 高溫低濕組升溫電阻變化

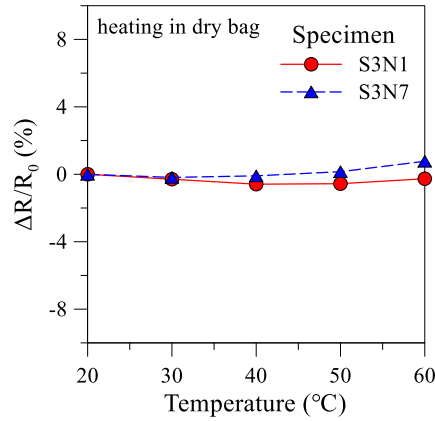


附圖 49 S3N1 升溫頻譜變化



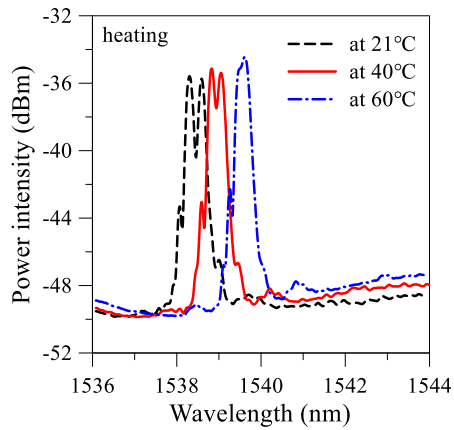
附圖 50 S3N7 升溫頻譜變化

S3.P13.DB19



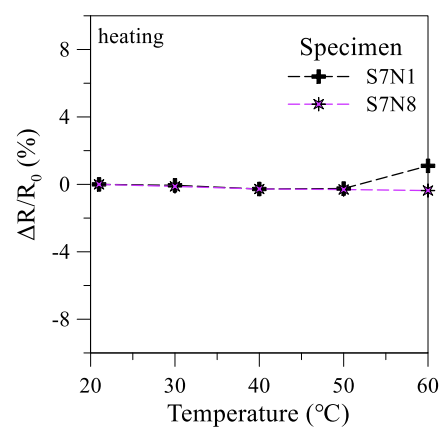
附圖 51 S3 高溫低濕組升溫電阻變化

S7N1.P2.DC59



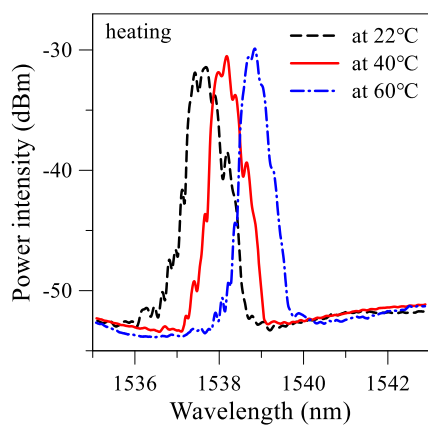
附圖 52 S7N1 升溫頻譜變化

S7.P2.DC59



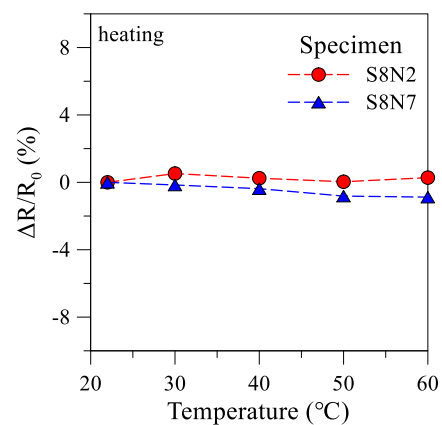
附圖 53 S7 高溫低濕組升溫電阻變化

S8N2.P1.DC13

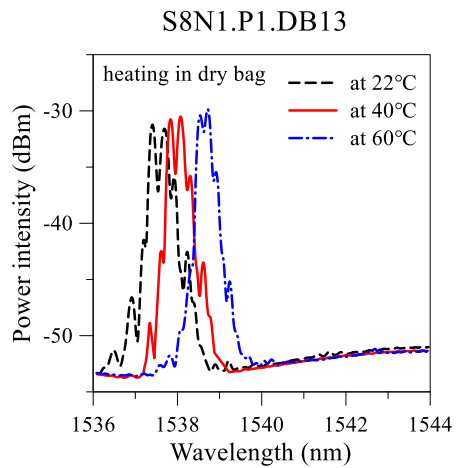


附圖 54 S8N2 升溫頻譜變化

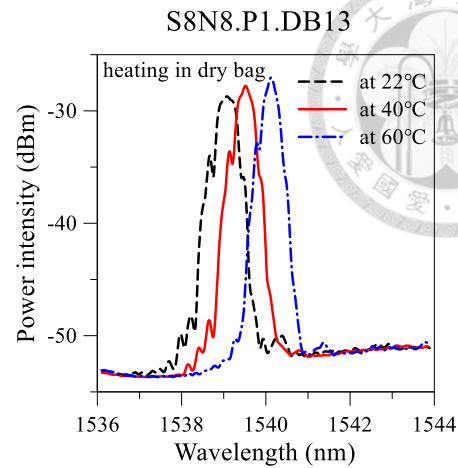
S8.P1.DC13



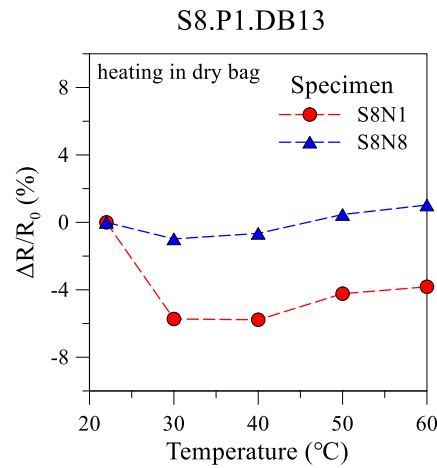
附圖 55 S8 高溫低濕組升溫電阻變化



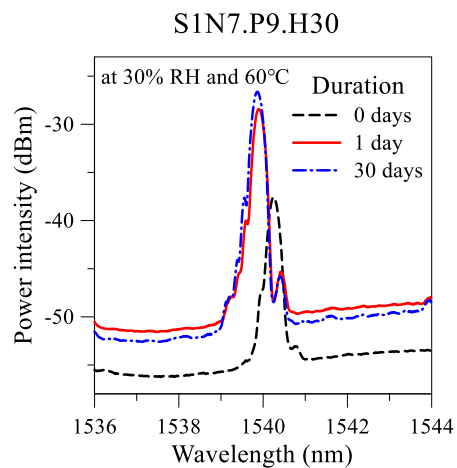
附圖 56 S8N1 升溫頻譜變化



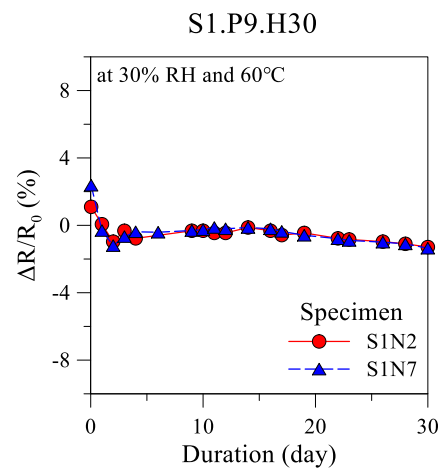
附圖 57 S8N8 升溫頻譜變化



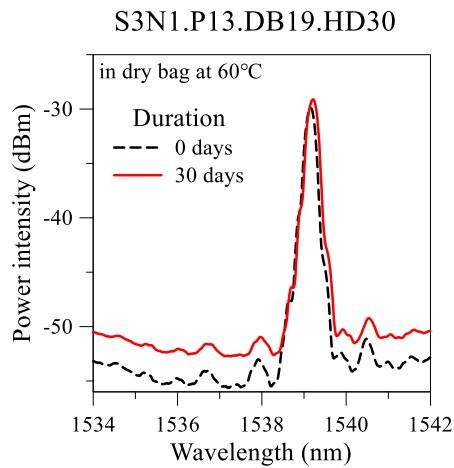
附圖 58 S8 乾燥袋中高溫低濕組升溫電阻變化



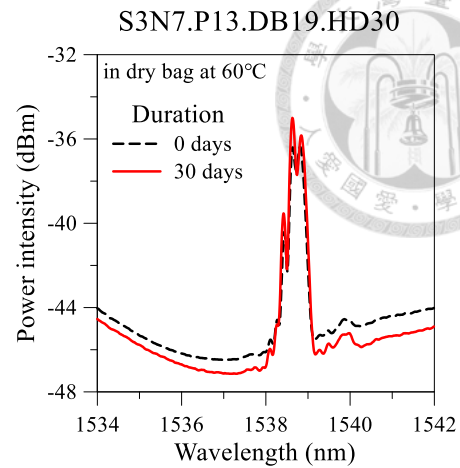
附圖 59 S1N7 高溫低濕期間頻譜變化



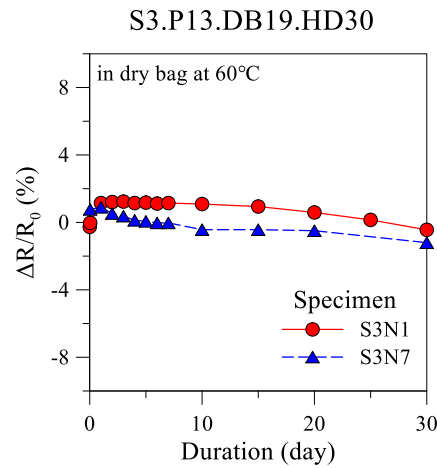
附圖 60 S1 高溫低濕組
高溫低濕期間頻譜變化



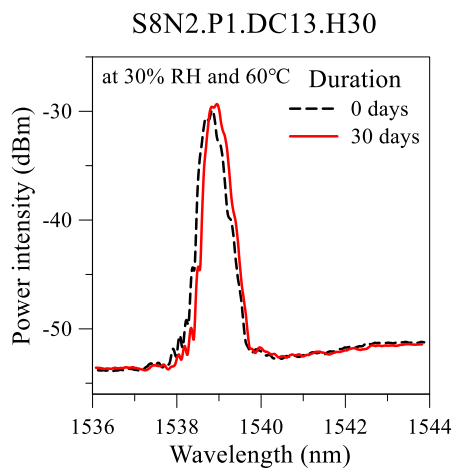
附圖 61 S3N1 高溫低濕期間頻譜變化



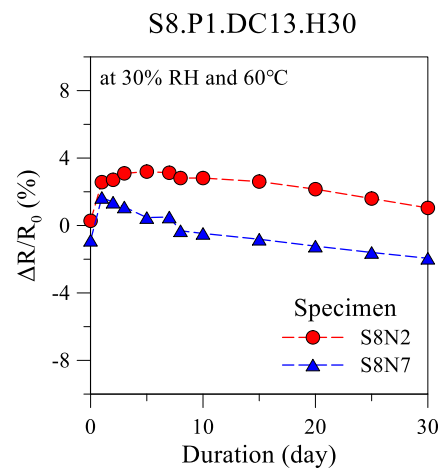
附圖 62 S3N7 高溫低濕期間頻譜變化



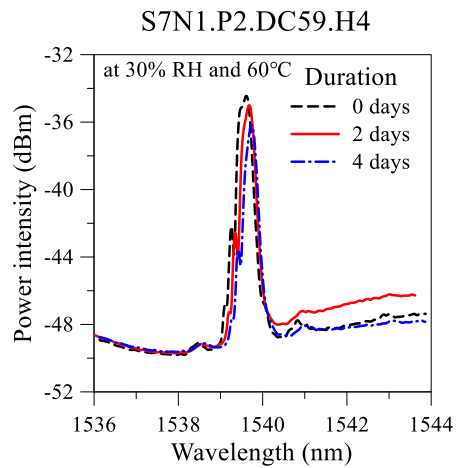
附圖 63 S3 高溫低濕組高溫低濕期間頻譜變化



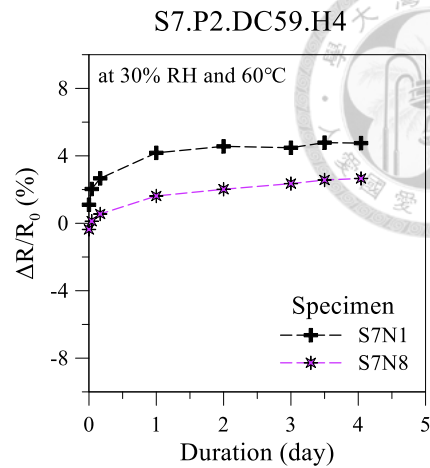
附圖 64 S8N2 高溫低濕期間頻譜變化



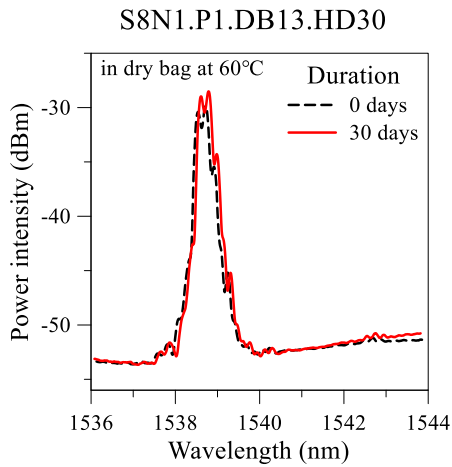
附圖 65 S8 高溫低濕組
高溫低濕期間頻譜變化



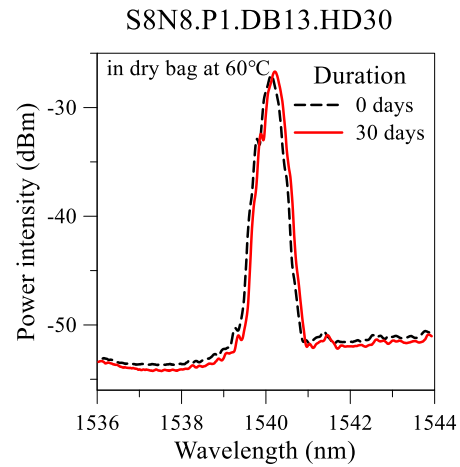
附圖 66 S7N1 高溫低濕期間頻譜變化



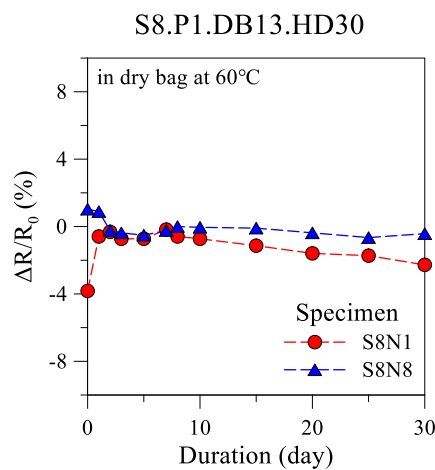
附圖 67 S7 高溫低濕組
高溫低濕期間頻譜變化



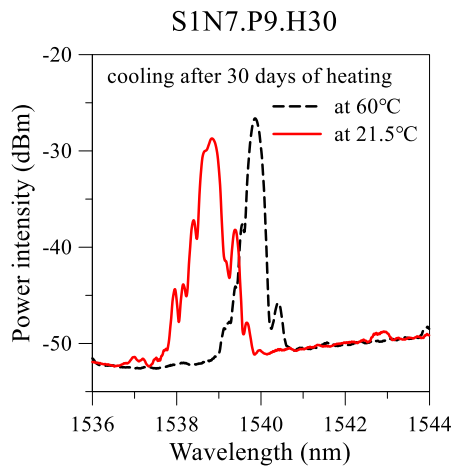
附圖 68 S8N1 高溫低濕期間頻譜變化



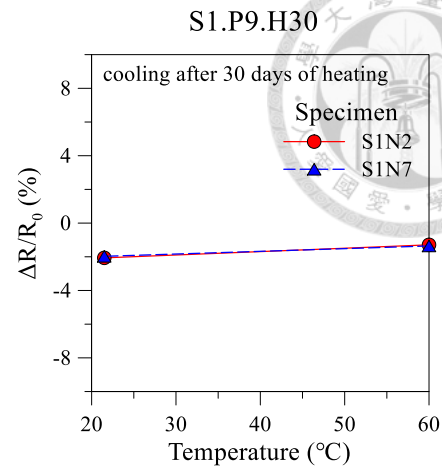
附圖 69 S8N8 高溫低濕期間頻譜變化



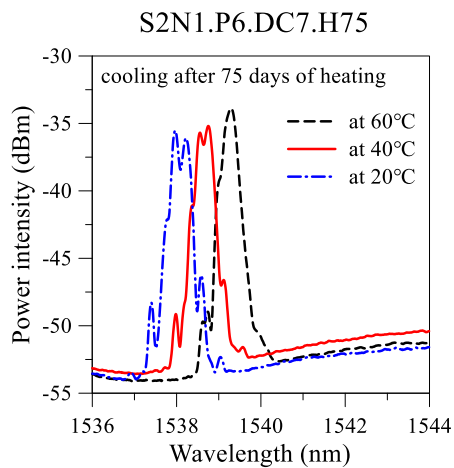
附圖 70 S8 乾燥袋中高溫低濕組高溫低濕期間頻譜變化



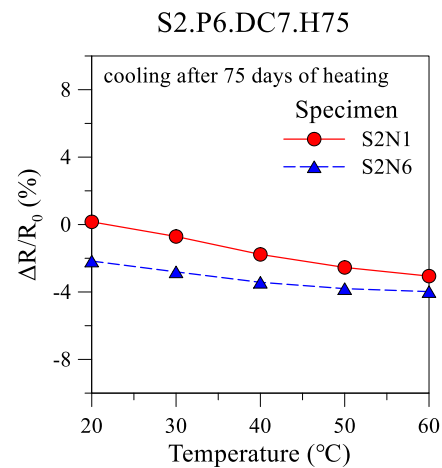
附圖 71 S1N7 高溫低濕後降溫頻譜變化



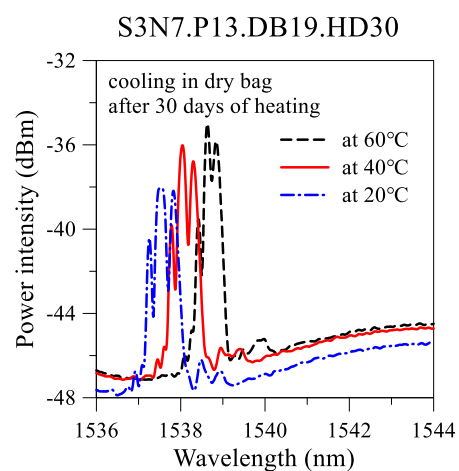
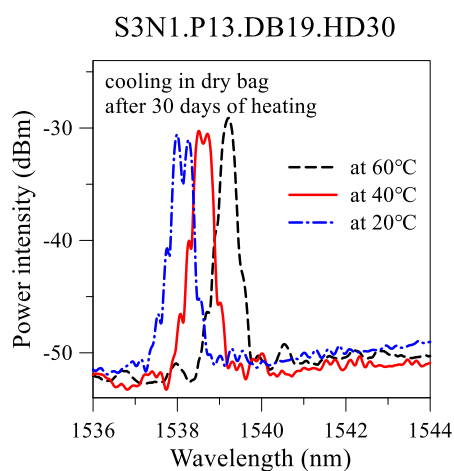
附圖 72 S1 高溫低濕組
高溫低濕後降溫電阻變化



附圖 73 S2N1 高溫低濕後降溫頻譜變化



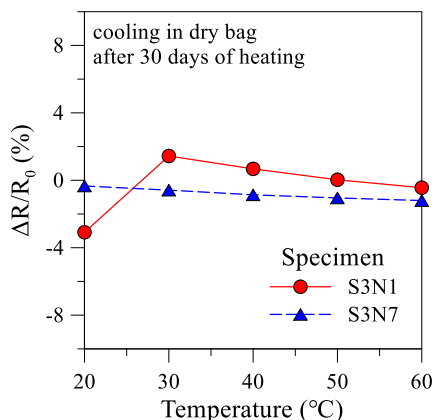
附圖 74 S2 高溫低濕組
高溫低濕後降溫電阻變化



附圖 75 S3 高溫低濕組高溫低濕後降溫頻譜變化：(左)S3N1；(右)S3N7

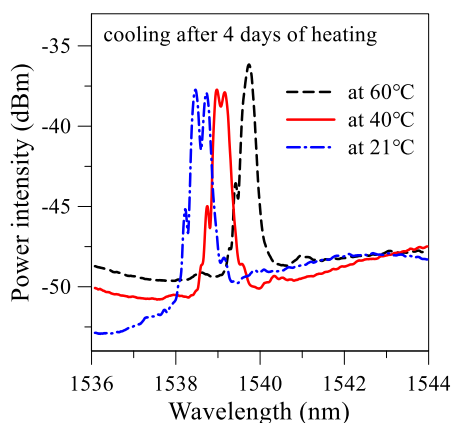


S3.P13.DB19.HD30



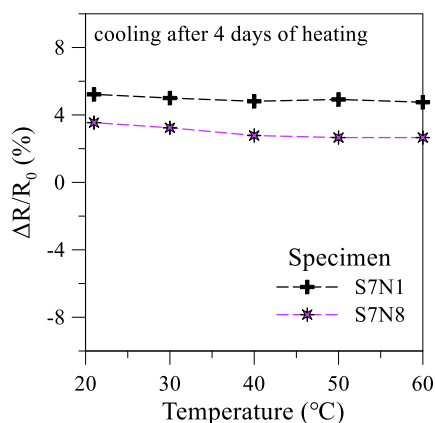
附圖 76 S3 高溫低濕組高溫低濕後降溫電阻變化

S7N1.P2.DC59.H4



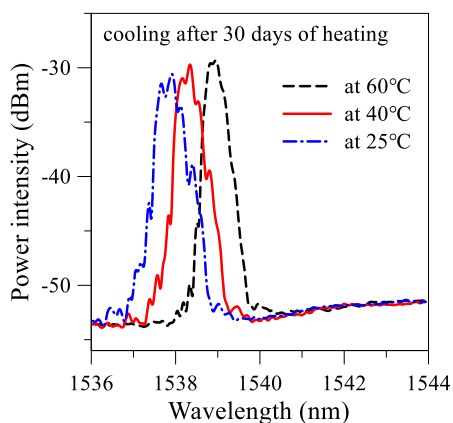
附圖 77 S7N1 高溫低濕後降溫頻譜變化

S7.P2.DC59.H4



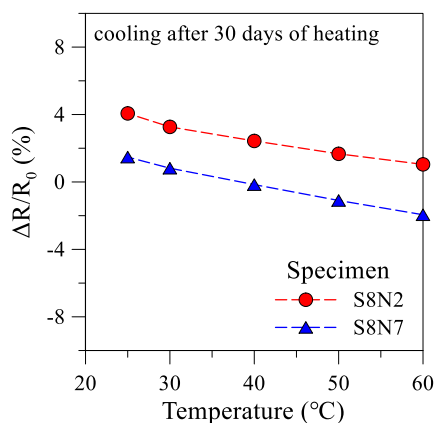
附圖 78 S7 高溫低濕組
高溫低濕後降溫電阻變化

S8N2.DC13.H30

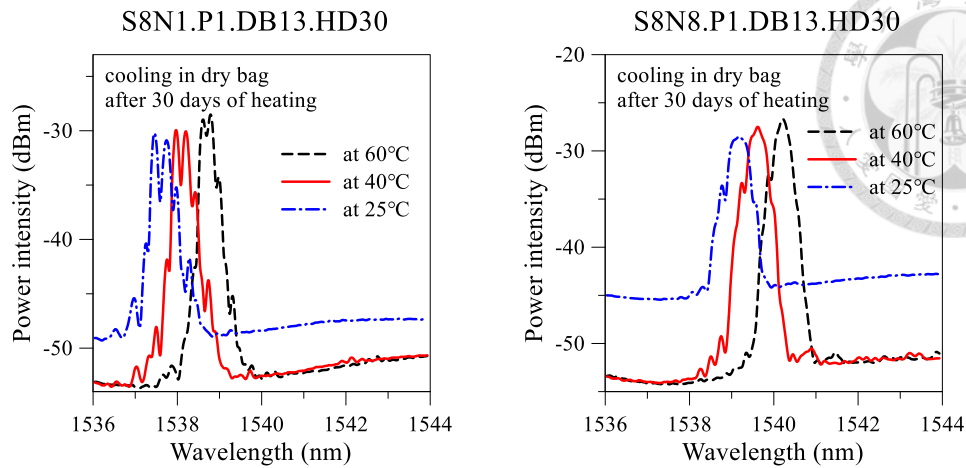


附圖 79 S8N2 高溫低濕後降溫頻譜變化

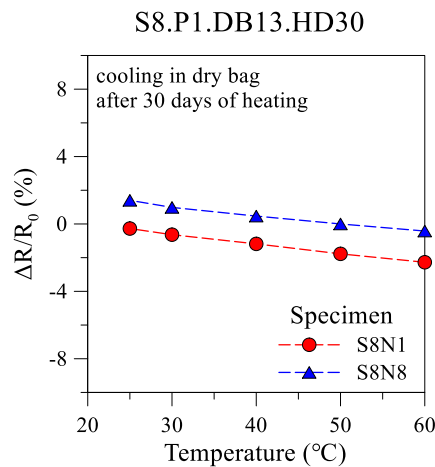
S8.P1.DC13.H30



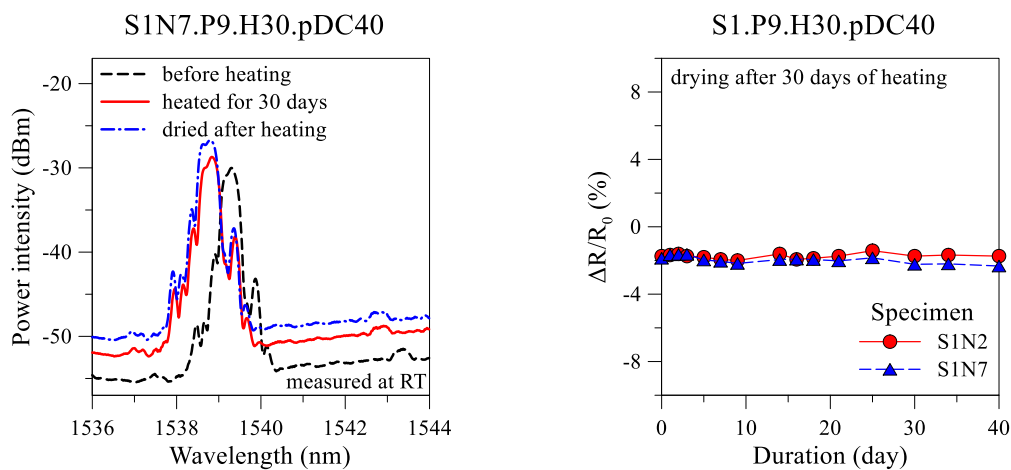
附圖 80 S8 高溫低濕組
高溫低濕後降溫電阻變化



附圖 81 S8 乾燥袋中高溫低濕組高溫低濕後降溫頻譜變化：(左)S8N1；(右)S8N8

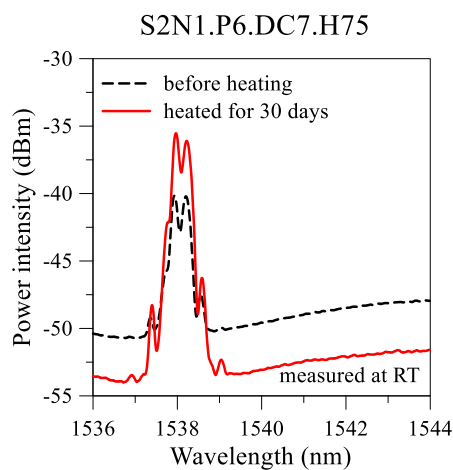


附圖 82 S8 乾燥袋中高溫低濕組高溫低濕後降溫電阻變化

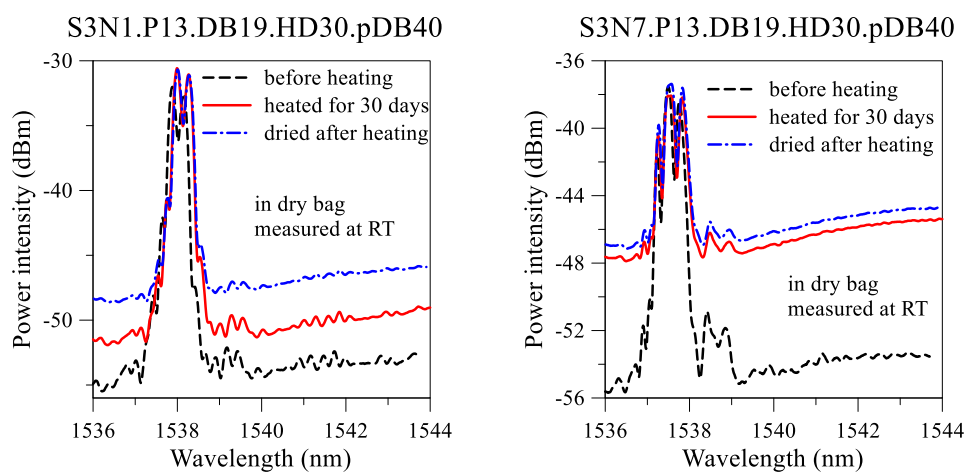


附圖 83 S1N7 高溫低濕前後頻譜變化

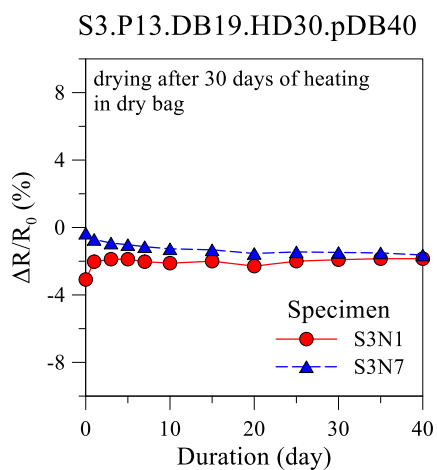
附圖 84 S1 高溫低濕組
後乾燥期間電阻變化



附圖 85 S2N1 高溫低濕前後頻譜變化



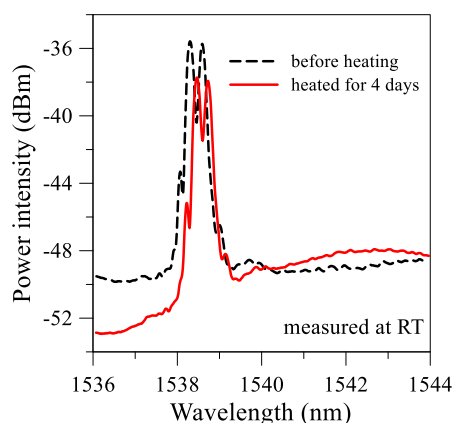
附圖 86 S3 高溫低濕組高溫低濕前後頻譜變化：(左)S3N1；(右)S3N7



附圖 87 S3 高溫低濕組後乾燥期間電阻變化

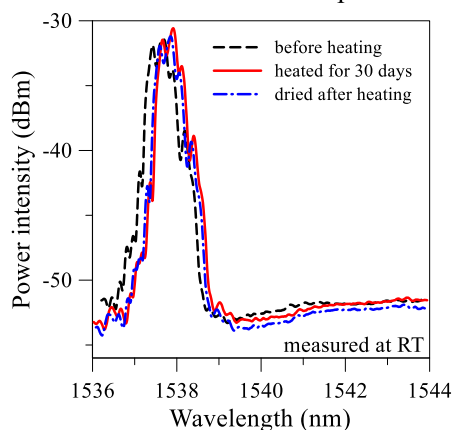


S7N1.P2.DC59.H4



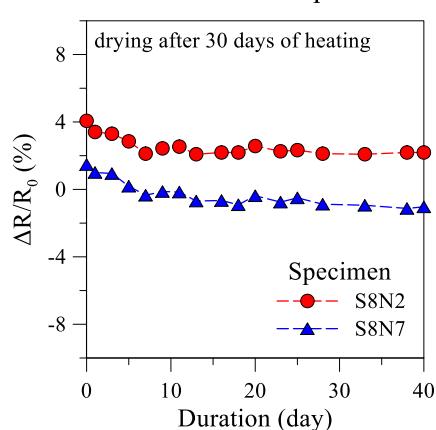
附圖 88 S7N1 高溫低濕前後頻譜變化

S8N2.P1.DC13.H30.pDC40



附圖 89 S8N2 高溫低濕前後頻譜變化

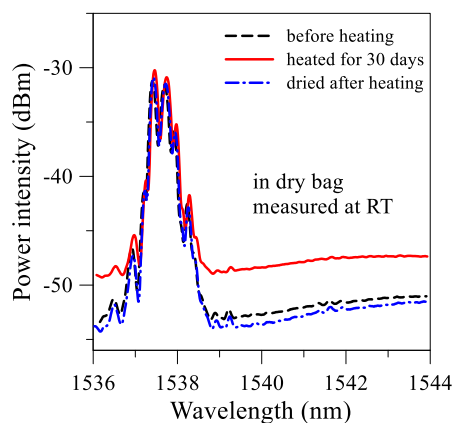
S8.P1.DC13.H30.pDC40



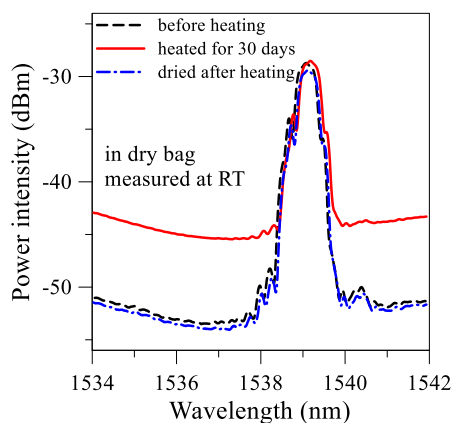
附圖 90 S8 高溫低濕組

後乾燥期間電阻變化

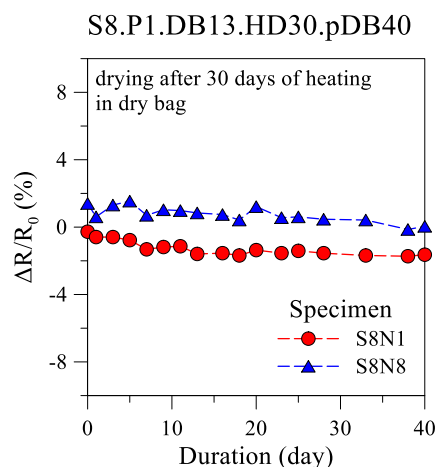
S8N1.P1.DB13.HD30.pDB40



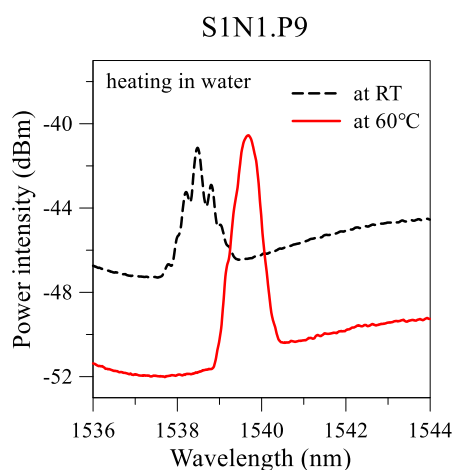
S8N8.P1.DB13.HD30.pDB40



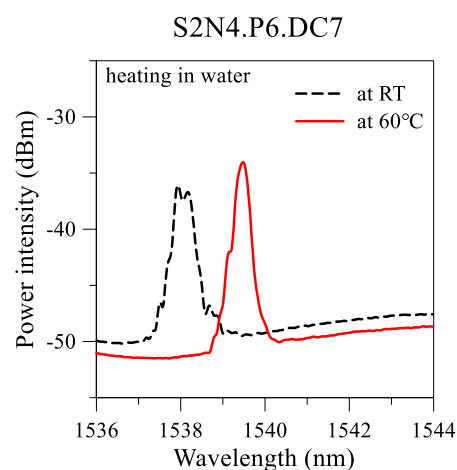
附圖 91 S8 乾燥袋中高溫低濕組高溫低濕前後頻譜變化：(左)S8N1；(右)S8N8



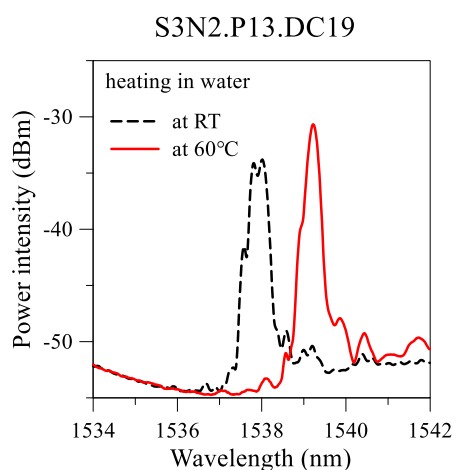
附圖 92 S8 乾燥袋中高溫低濕組後乾燥期間電阻變化



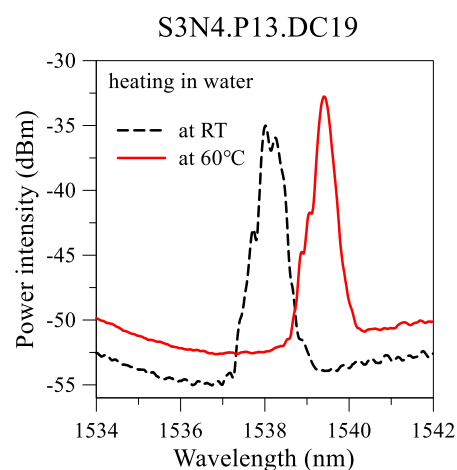
附圖 93 S1N1 升溫頻譜變化



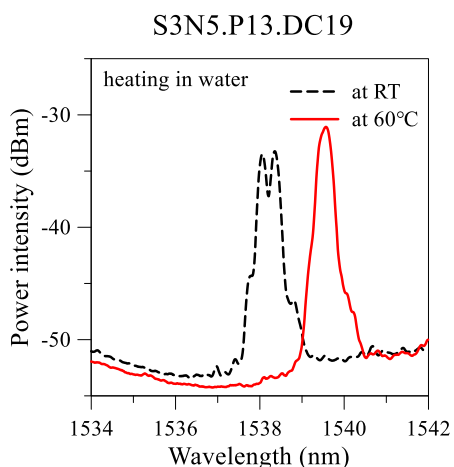
附圖 94 S2N4 升溫頻譜變化



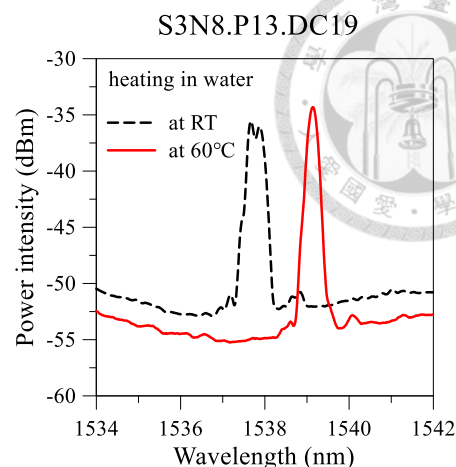
附圖 95 S3N2 升溫頻譜變化



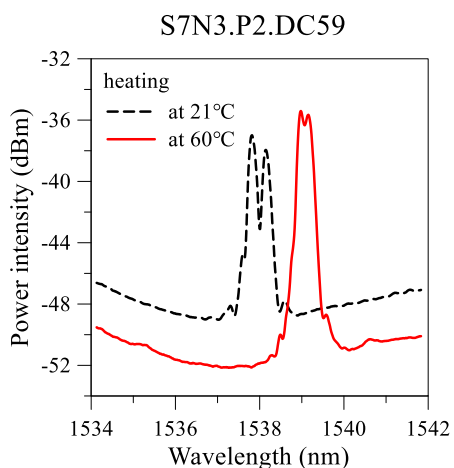
附圖 96 S3N4 升溫頻譜變化



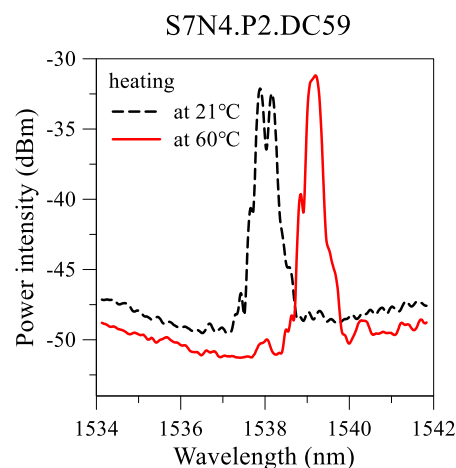
附圖 97 S3N5 升溫頻譜變化



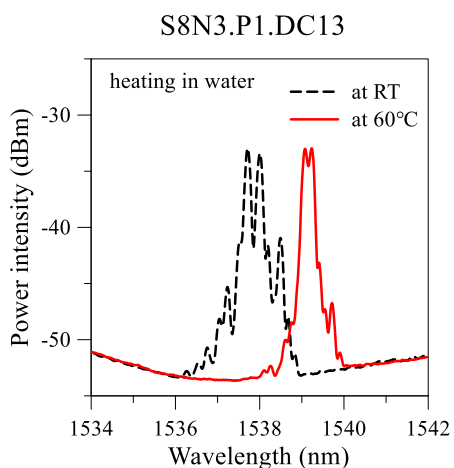
附圖 98 S3N6 升溫頻譜變化



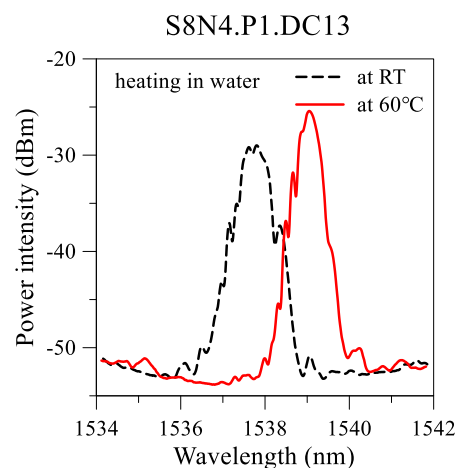
附圖 99 S7N3 升溫頻譜變化



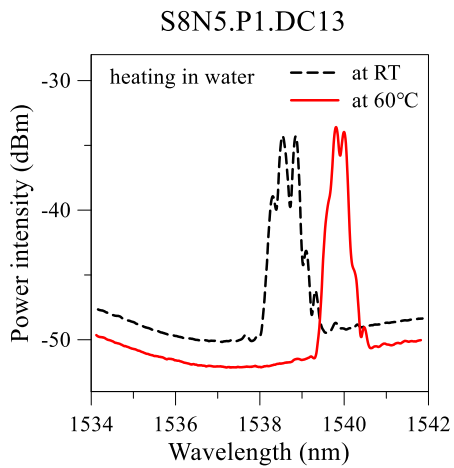
附圖 100 S7N4 升溫頻譜變化



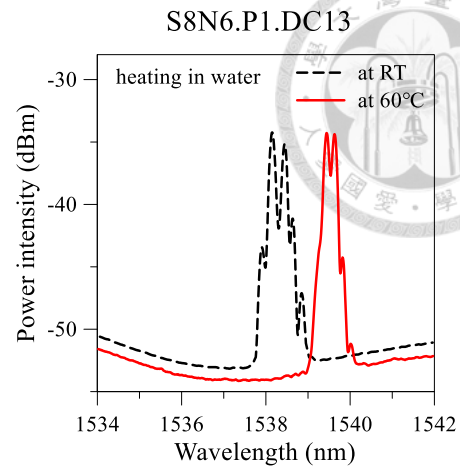
附圖 101 S8N3 升溫頻譜變化



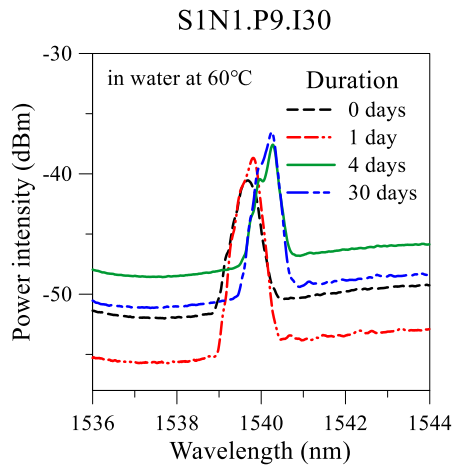
附圖 102 S8N4 升溫頻譜變化



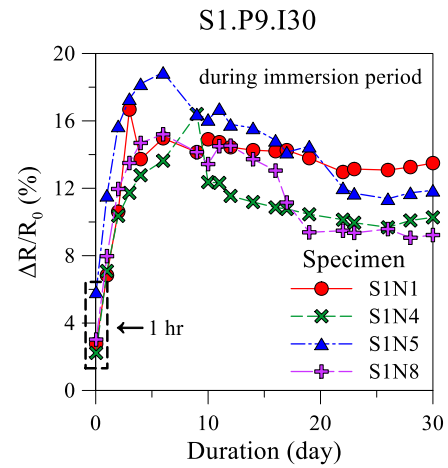
附圖 103 S8N4 升溫頻譜變化



附圖 104 S8N6 升溫頻譜變化

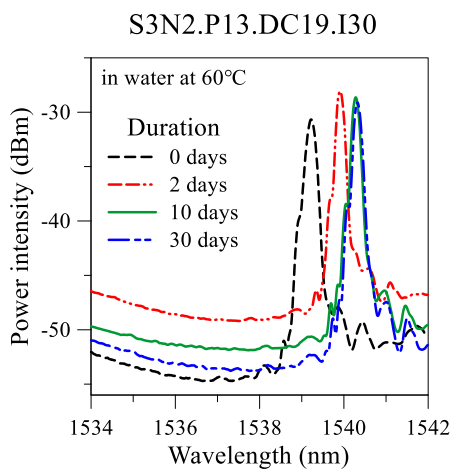


附圖 105 S1N1 浸泡熱水期間頻譜變化

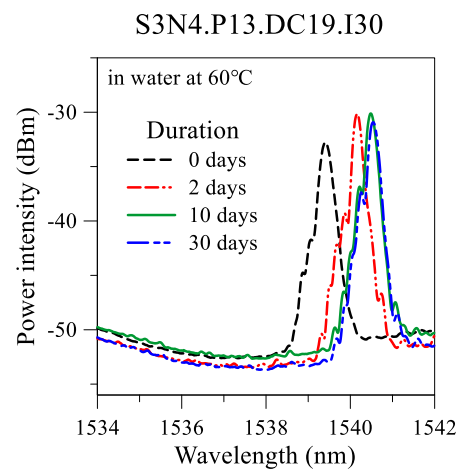


附圖 106 S1 浸泡熱水組

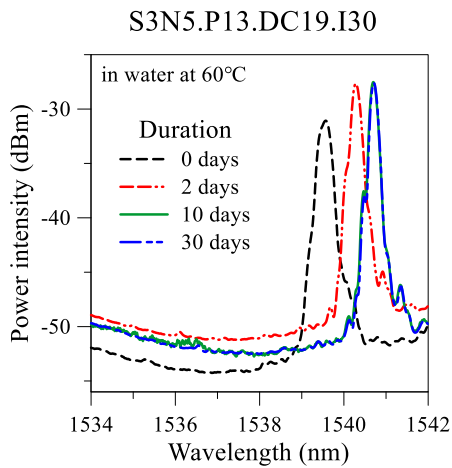
浸泡熱水期間電阻變化



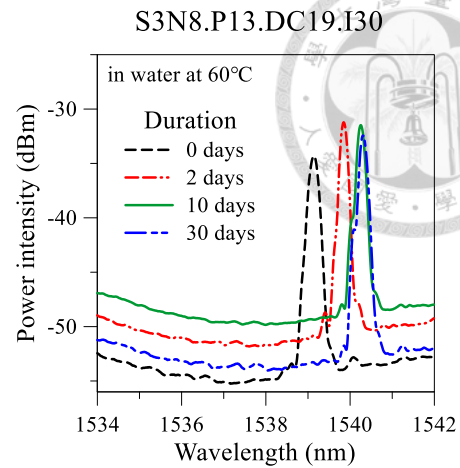
附圖 107 S3N2 浸泡熱水期間頻譜變化



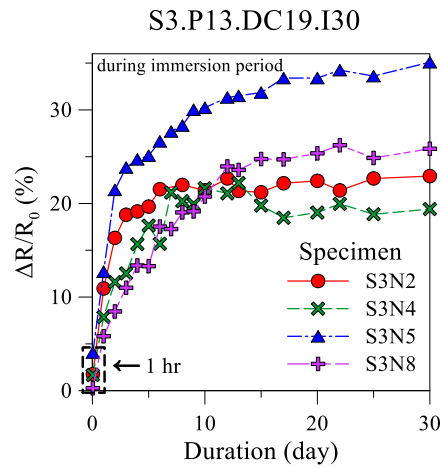
附圖 108 S3N4 浸泡熱水期間頻譜變化



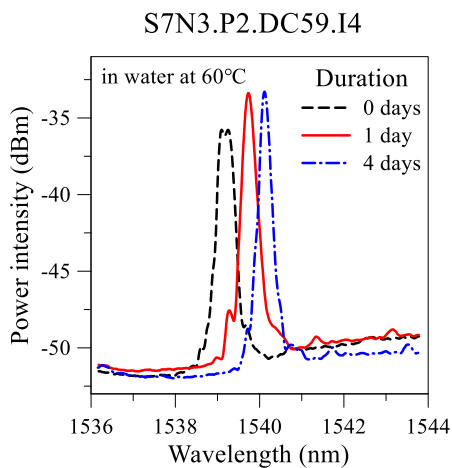
附圖 109 S3N5 浸泡熱水期間頻譜變化



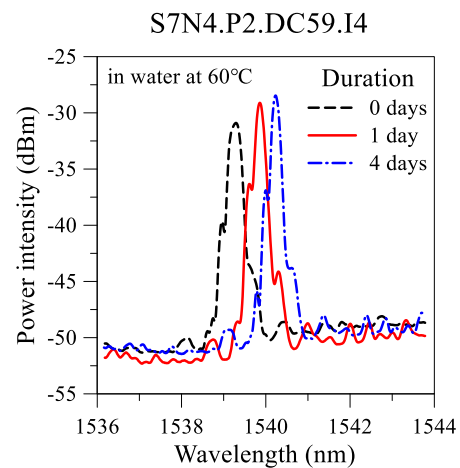
附圖 110 S3N8 浸泡熱水期間頻譜變化



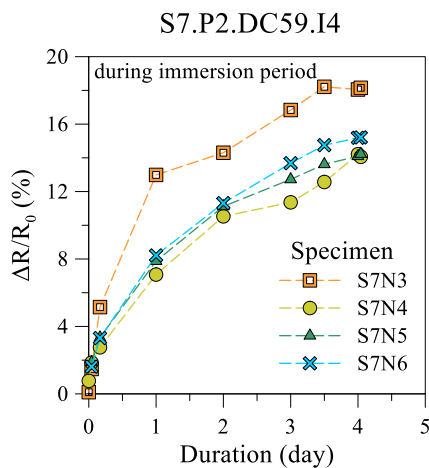
附圖 111 S3 浸泡熱水組浸泡熱水期間電阻變化



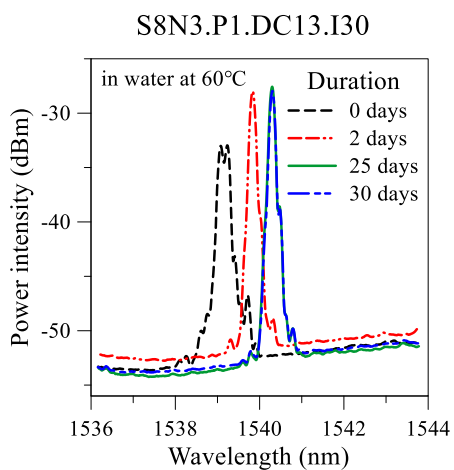
附圖 112 S7N3 浸泡熱水期間頻譜變化



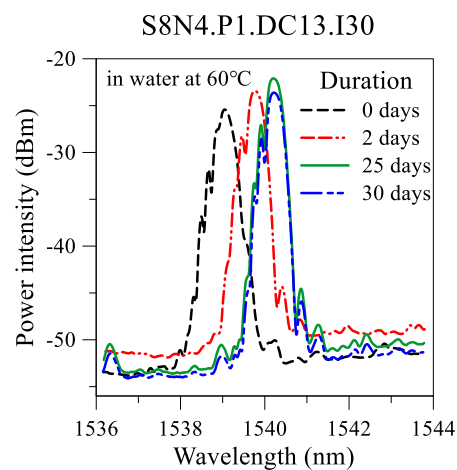
附圖 113 S7N4 浸泡熱水期間頻譜變化



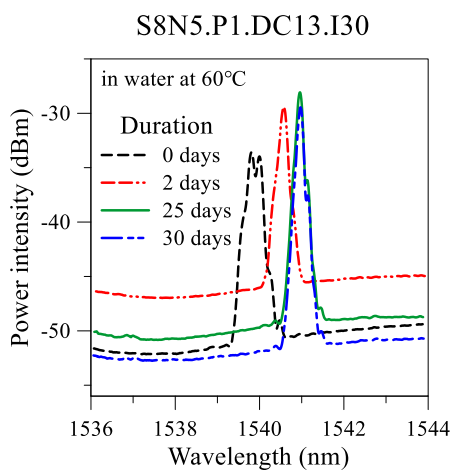
附圖 114 S7 浸泡熱水組浸泡熱水期間電阻變化



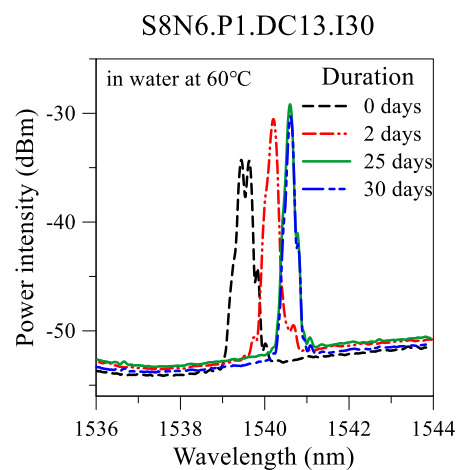
附圖 115 S8N3 浸泡熱水期間頻譜變化



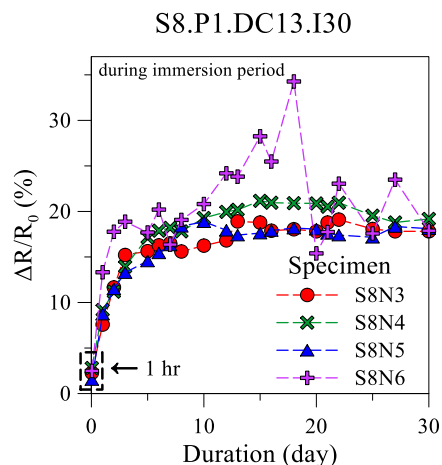
附圖 116 S8N3 浸泡熱水期間頻譜變化



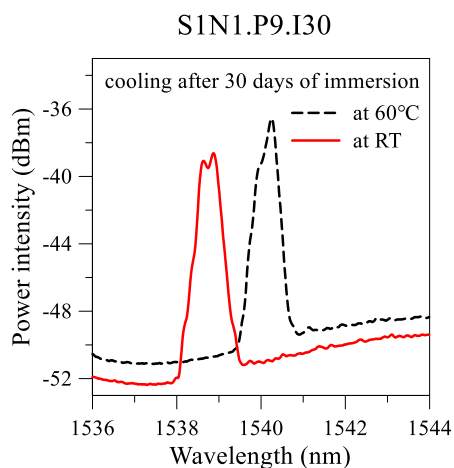
附圖 117 S8N3 浸泡熱水期間頻譜變化



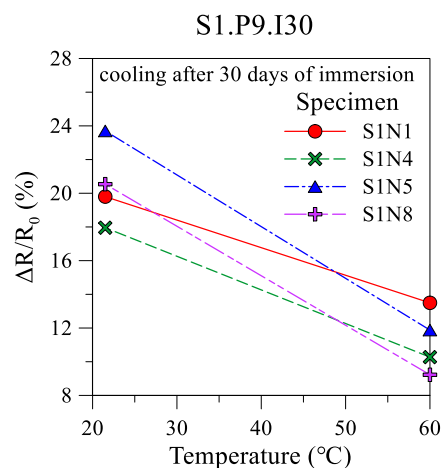
附圖 118 S8N3 浸泡熱水期間頻譜變化



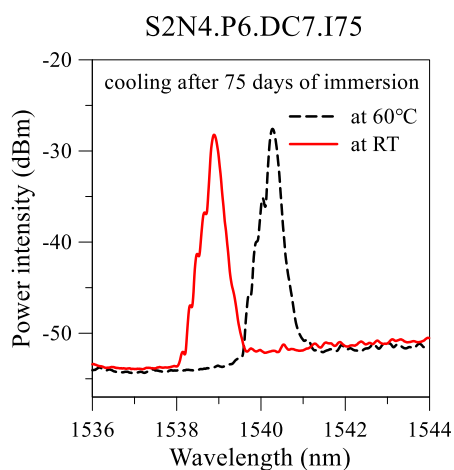
附圖 119 S8 浸泡熱水組浸泡熱水期間電阻變化



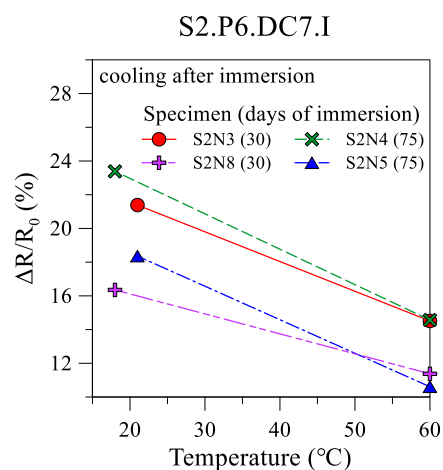
附圖 120 S1N1 浸泡熱水後降溫頻譜變化



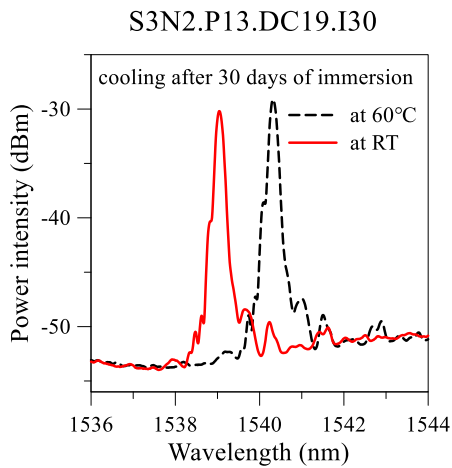
附圖 121 S1 浸泡熱水組
浸泡熱水後降溫電阻變化



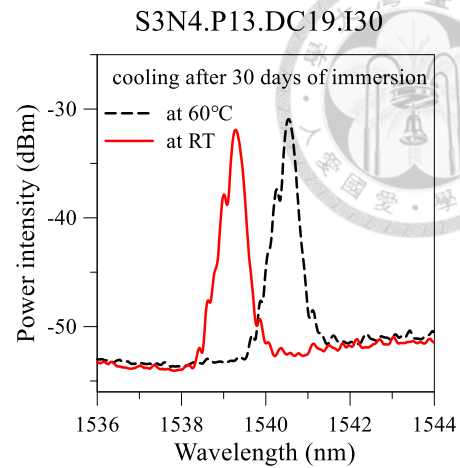
附圖 122 S2N4 浸泡熱水後降溫頻譜變化



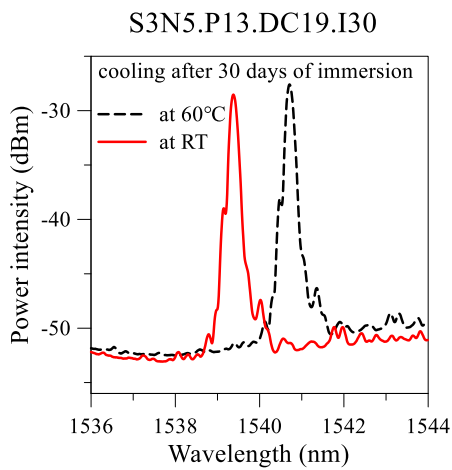
附圖 123 S2 浸泡熱水組
浸泡熱水後降溫電阻變化



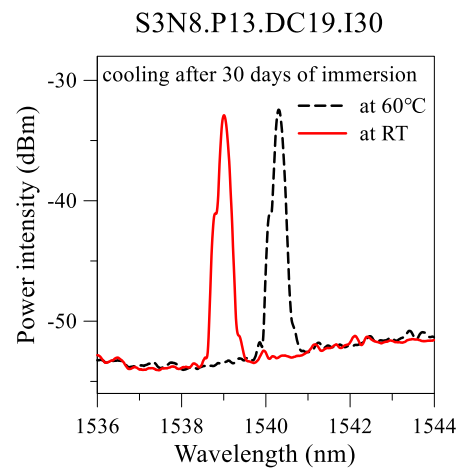
附圖 124 S3N2 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



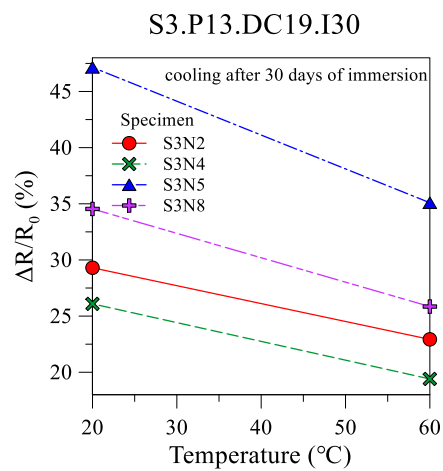
附圖 125 S3N4 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



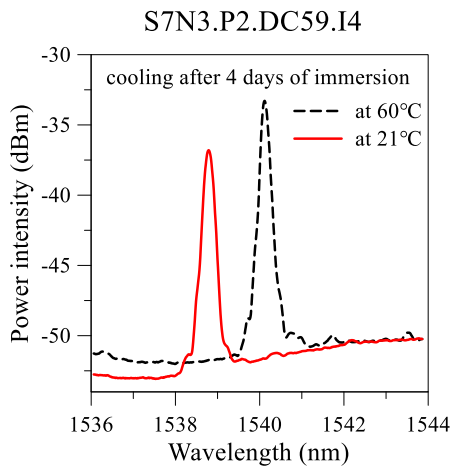
附圖 126 S3N5 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



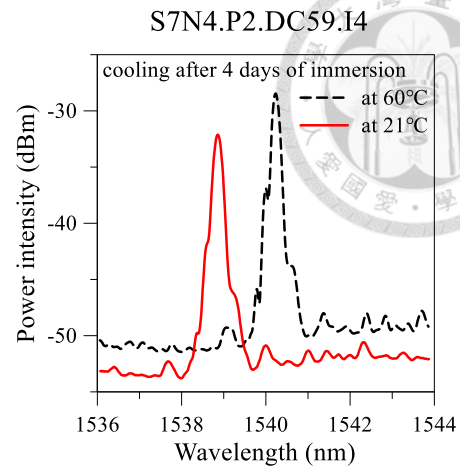
附圖 127 S3N8 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



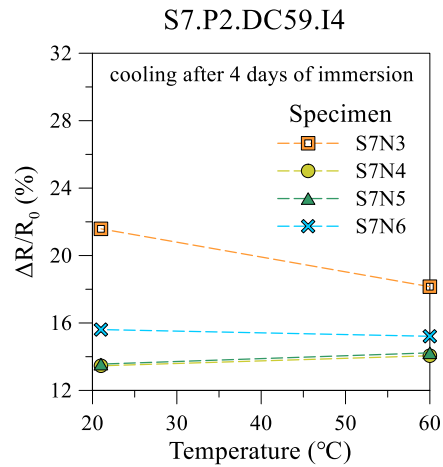
附圖 128 S3 浸泡熱水組浸泡熱水後降溫電阻變化



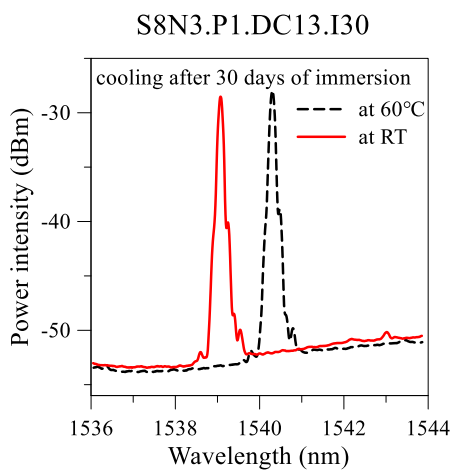
附圖 129 S7N3 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



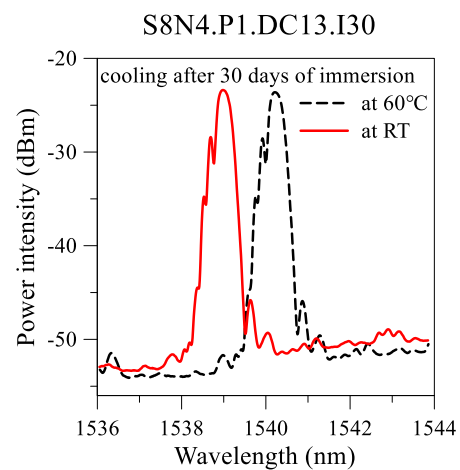
附圖 130 S7N4 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



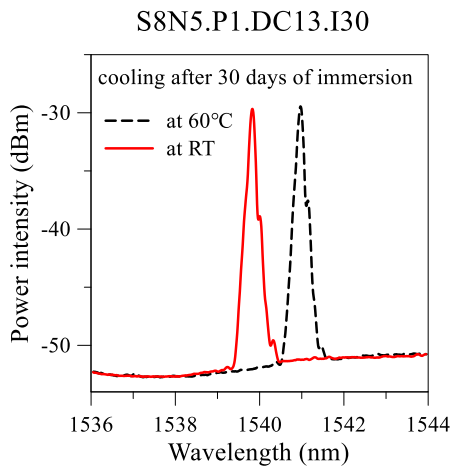
附圖 131 S7 浸泡熱水組浸泡熱水後降溫電阻變化



附圖 132 S8N3 浸泡熱水後降溫
頻譜變化

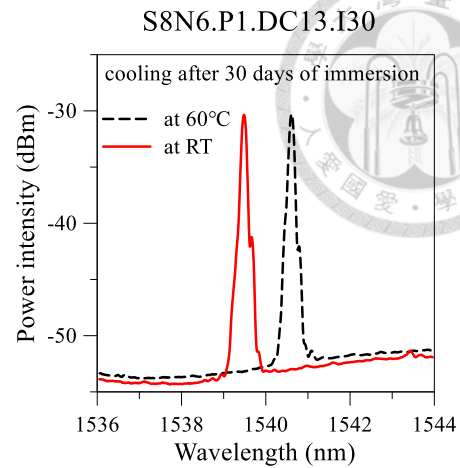


附圖 133 S8N4 浸泡熱水後降溫
頻譜變化



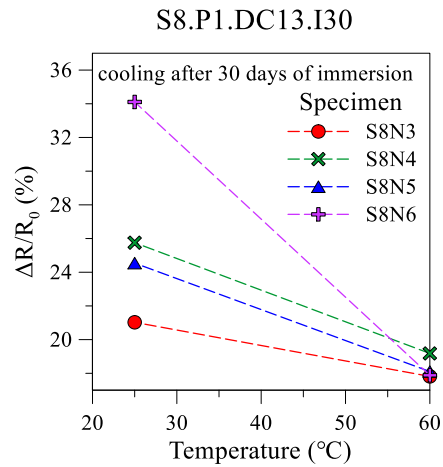
附圖 134 S8N5 浸泡熱水後降溫

頻譜變化

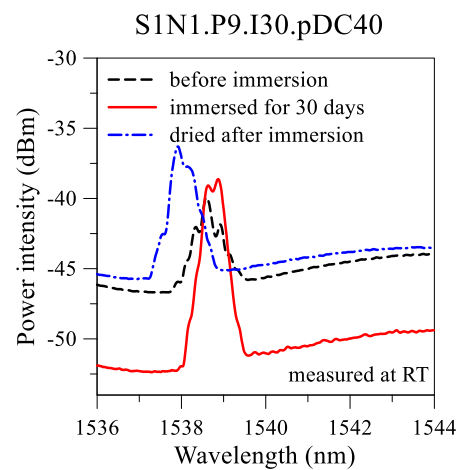
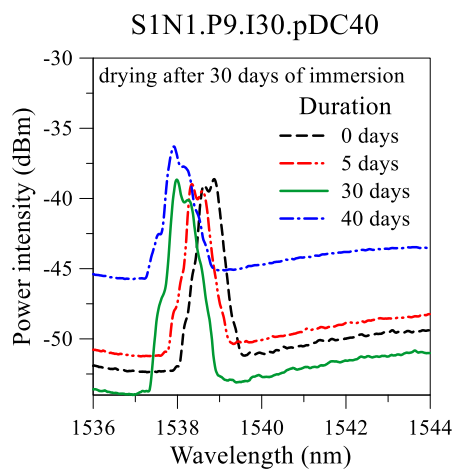


附圖 135 S8N6 浸泡熱水後降溫

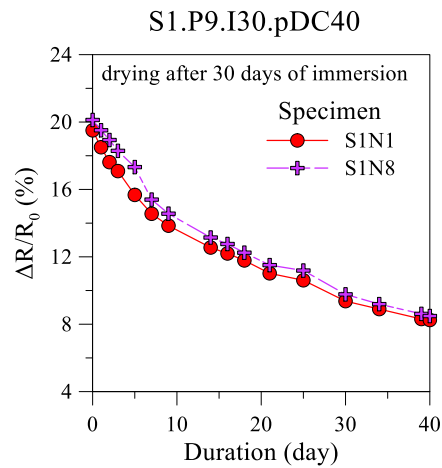
頻譜變化



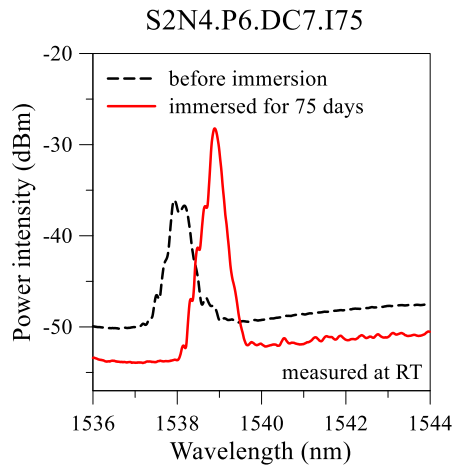
附圖 136 S8 浸泡熱水組浸泡熱水後降溫電阻變化



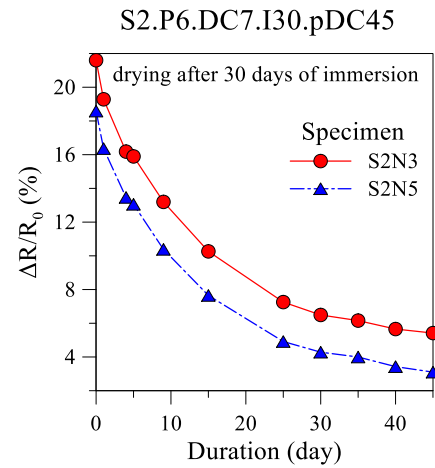
附圖 137 S1N1 浸泡熱水 (左)後乾燥期間 (右)前後 頻譜變化



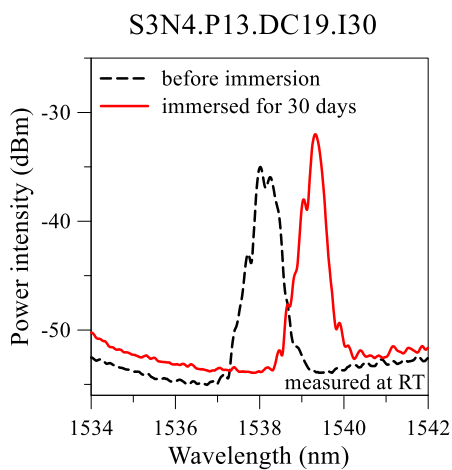
附圖 138 S1 浸泡熱水後乾燥組後乾燥期間電阻變化



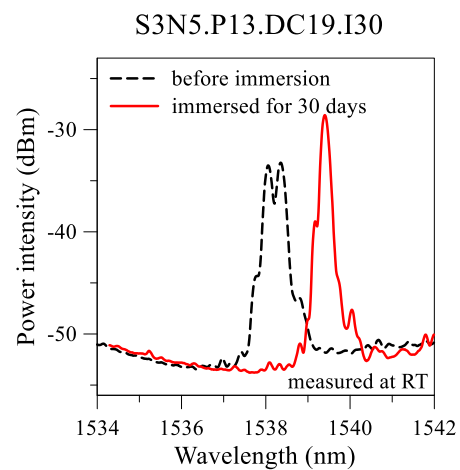
附圖 139 S2N4 浸泡熱水前後頻譜變化



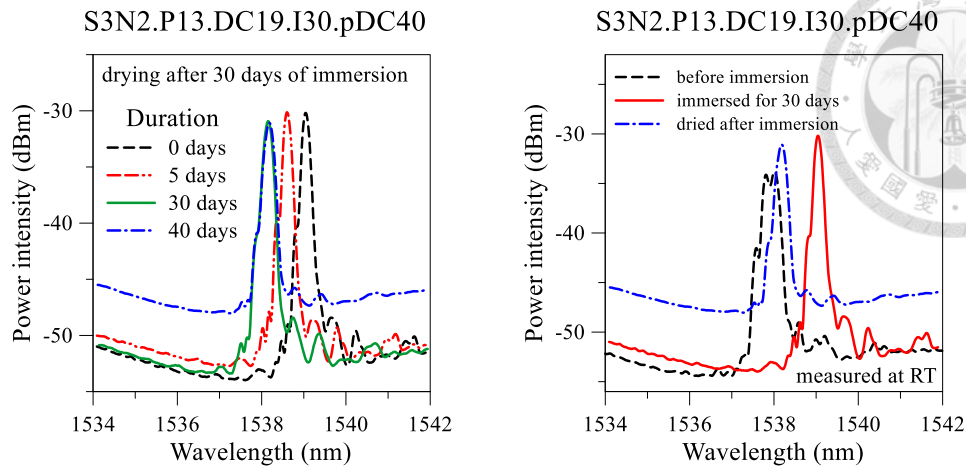
附圖 140 S2 浸泡熱水後乾燥組
後乾燥期間電阻變化



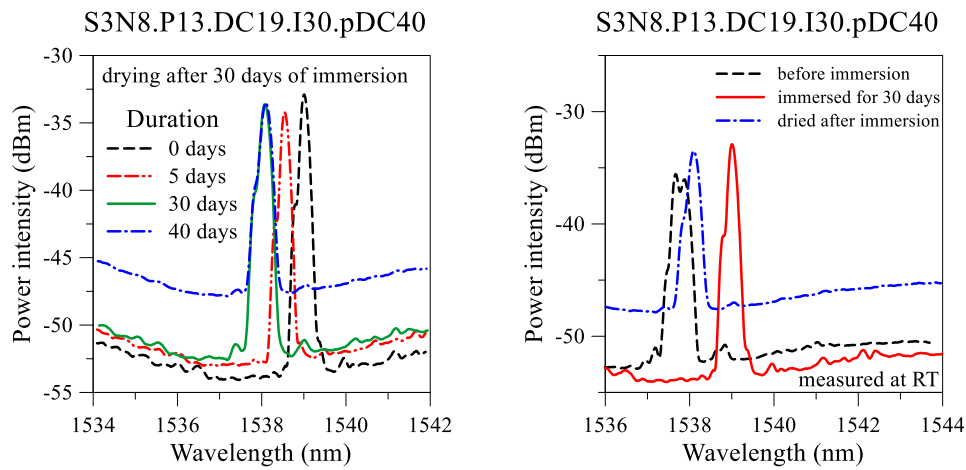
附圖 141 S3N4 浸泡熱水前後頻譜變化



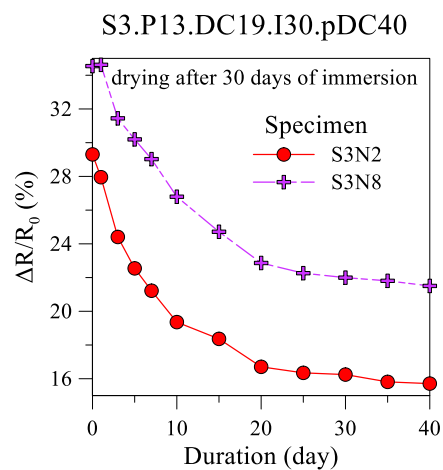
附圖 142 S3N5 浸泡熱水前後頻譜變化



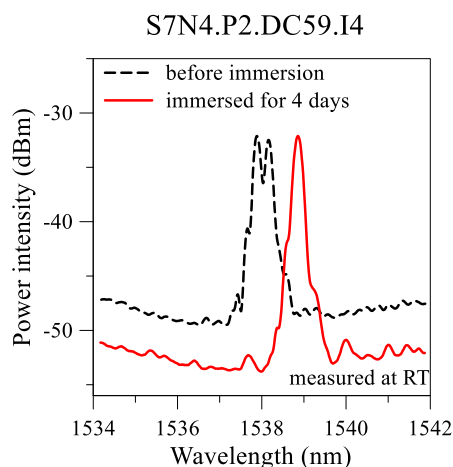
附圖 143 S3N2 浸泡熱水 (左)後乾燥期間 (右)前後 頻譜變化



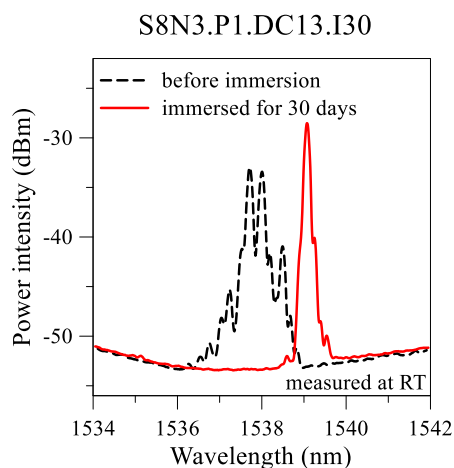
附圖 144 S3N8 浸泡熱水 (左)後乾燥期間 (右)前後 頻譜變化



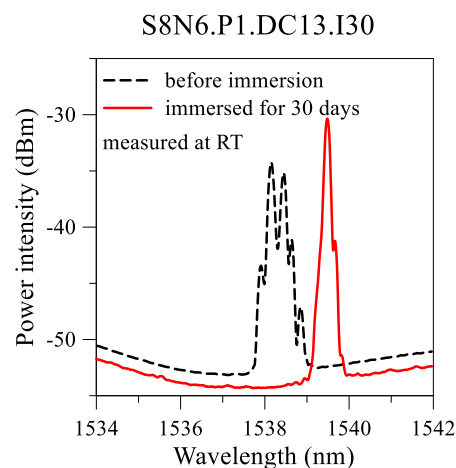
附圖 145 S3 浸泡熱水後乾燥組後乾燥期間電阻變化



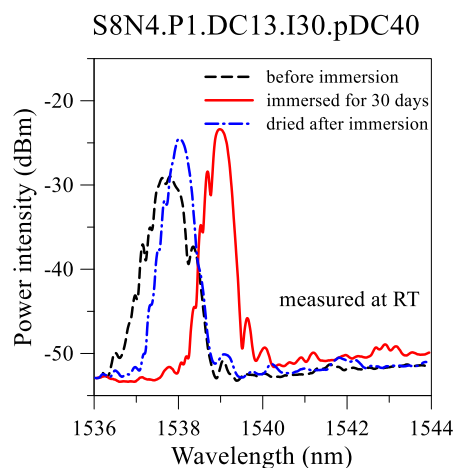
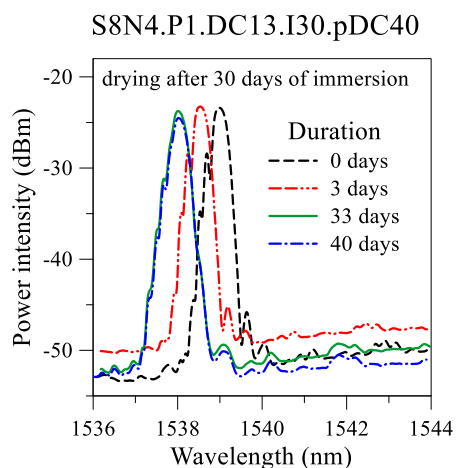
附圖 146 S7N4 浸泡熱水前後頻譜變化



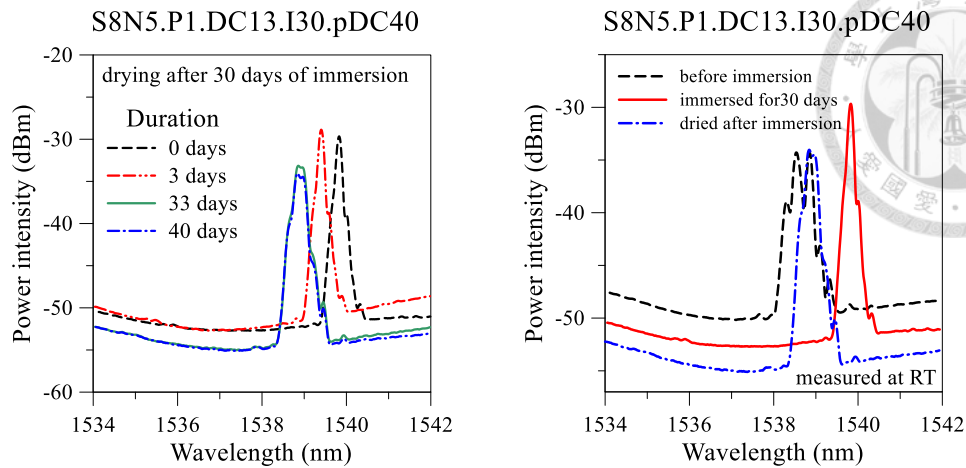
附圖 147 S8N3 浸泡熱水前後頻譜變化



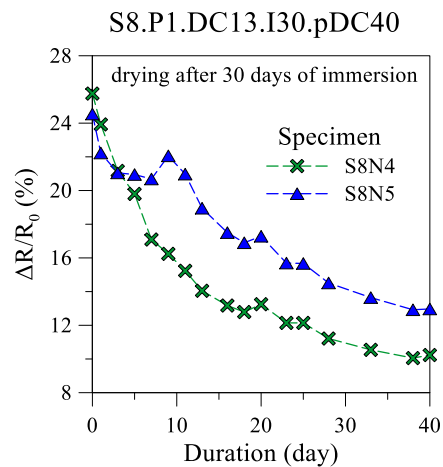
附圖 148 S8N6 浸泡熱水前後頻譜變化



附圖 149 S8N4 浸泡熱水 (左)後乾燥期間 (右)前後 頻譜變化



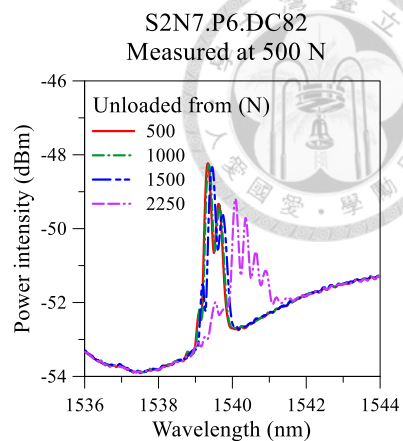
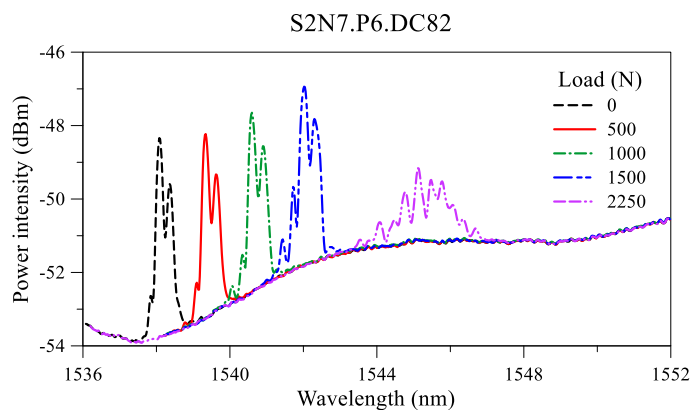
附圖 150 S8N5 浸泡熱水 (左)後乾燥期間 (右)前後 頻譜變化



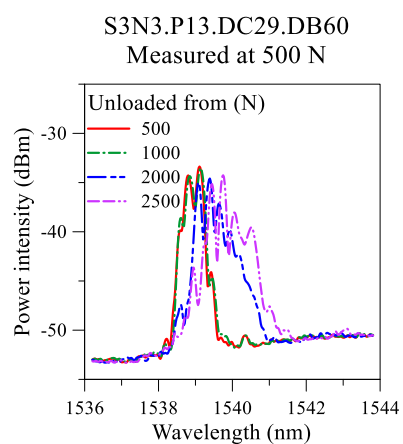
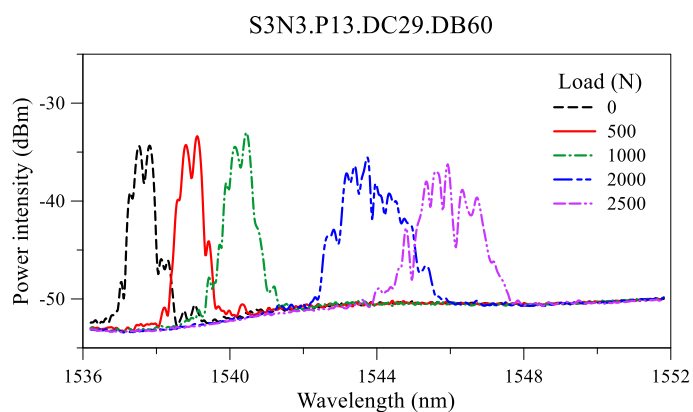
附圖 151 S8 浸泡熱水後乾燥組後乾燥期間電阻變化

試片	個別強度 (N)	同批 平均強度(N)	變異係數 (%)
S1N3	7399	7702.5	3.94
S1N6	8006		
S2N2	7503	7753	3.22
S2N7	8003		
S3N3	7524	7518.5	0.07
S3N6	7513		
S7N2	7505	7504.5	0.01
S7N7	7504		

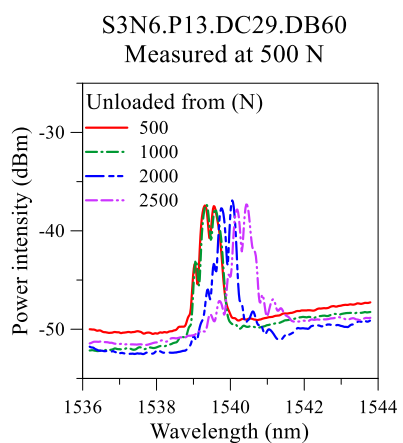
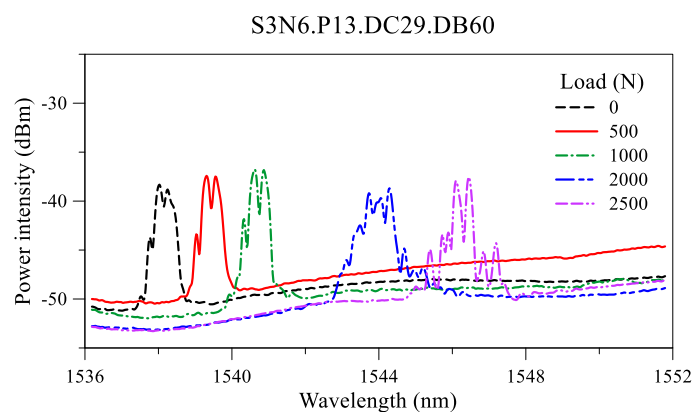
附圖 152 僅乾燥處理試片強度



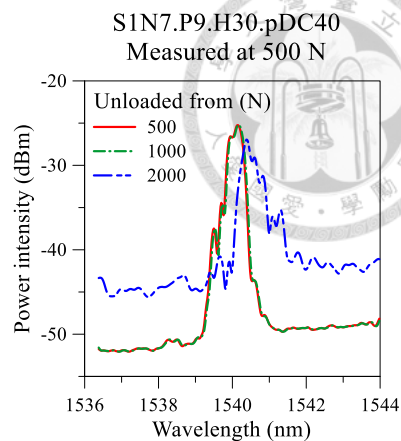
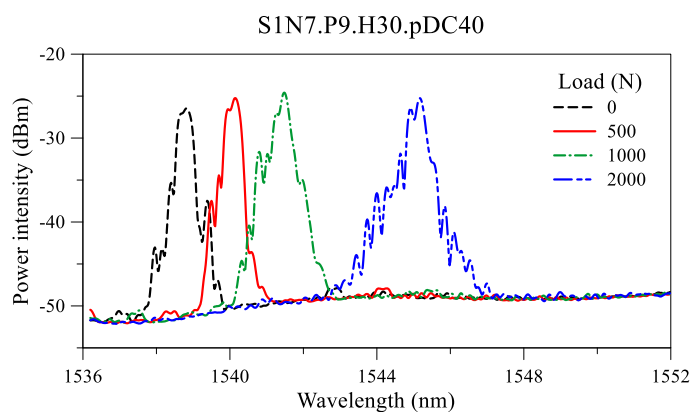
附圖 153 S2N7 僅乾燥處理後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



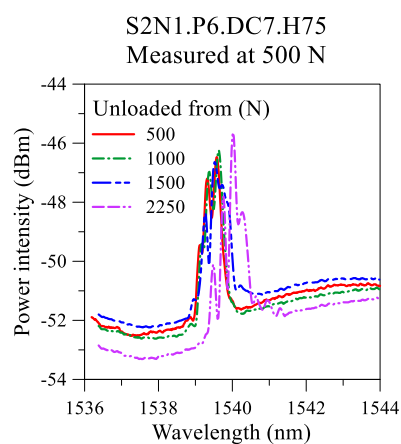
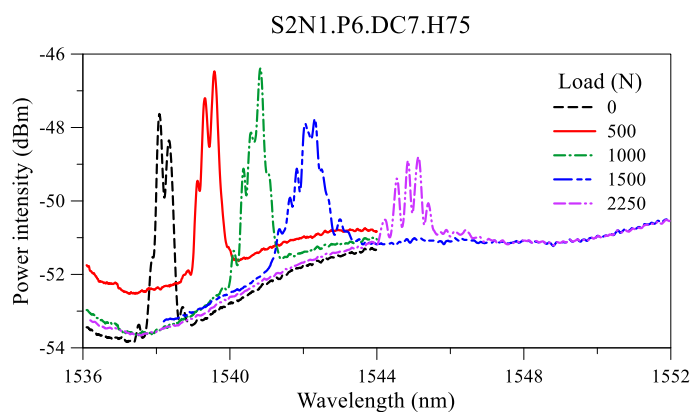
附圖 154 S3N3 僅乾燥處理後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



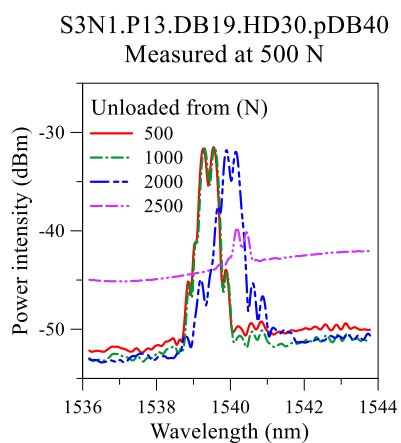
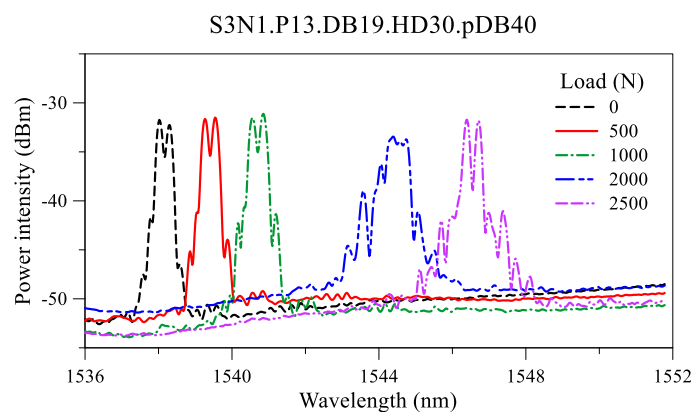
附圖 155 S3N6 僅乾燥處理後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



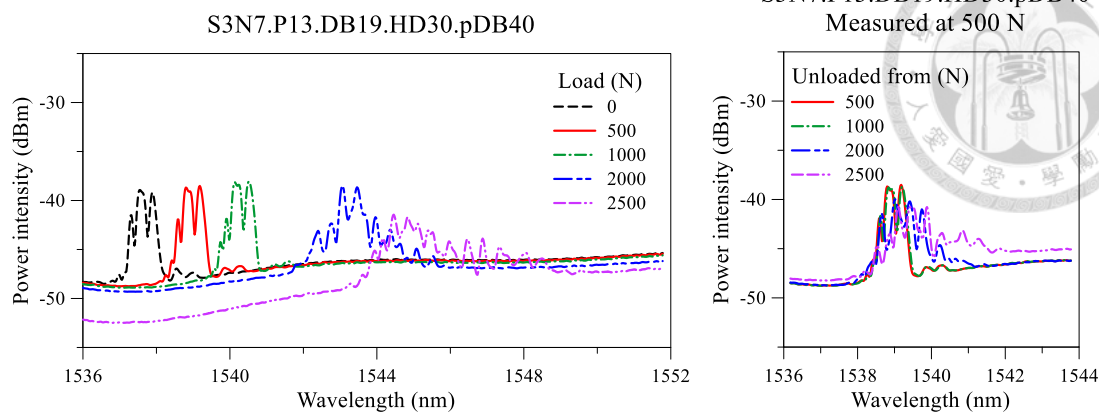
附圖 156 S1N7 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



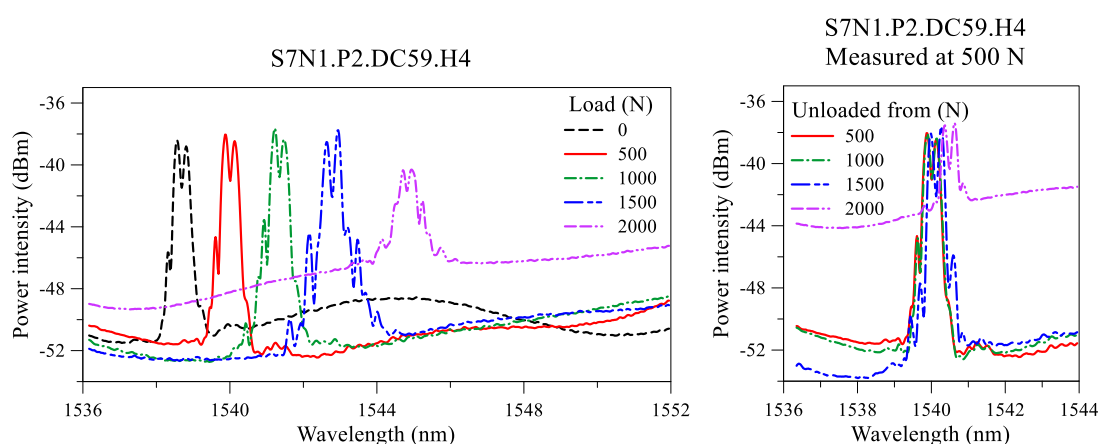
附圖 157 S2N1 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



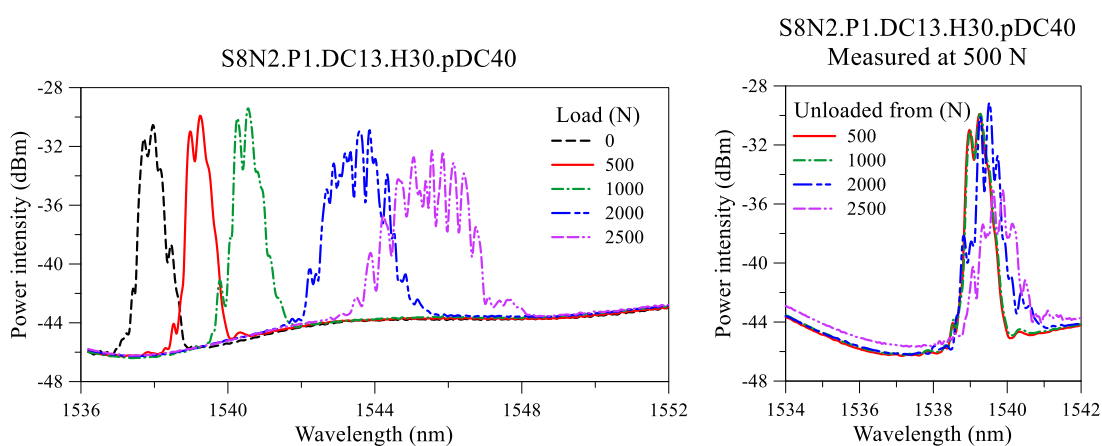
附圖 158 S3N1 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



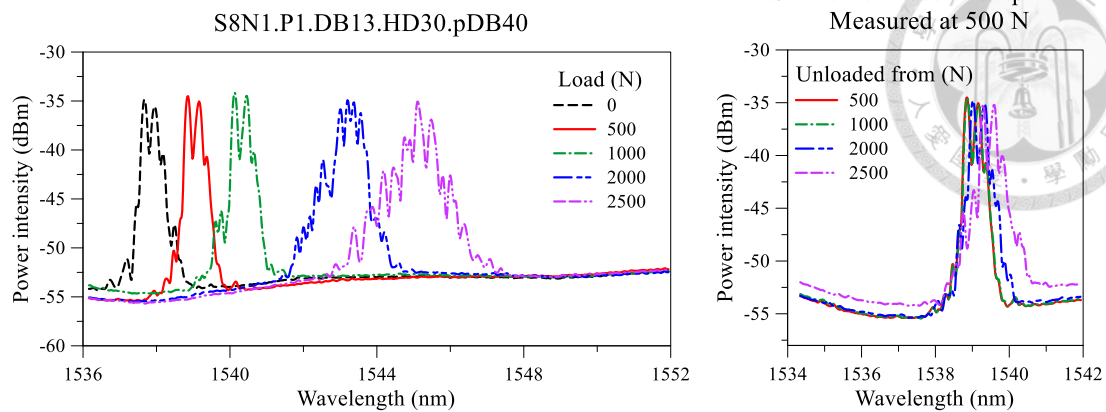
附圖 159 S3N7 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



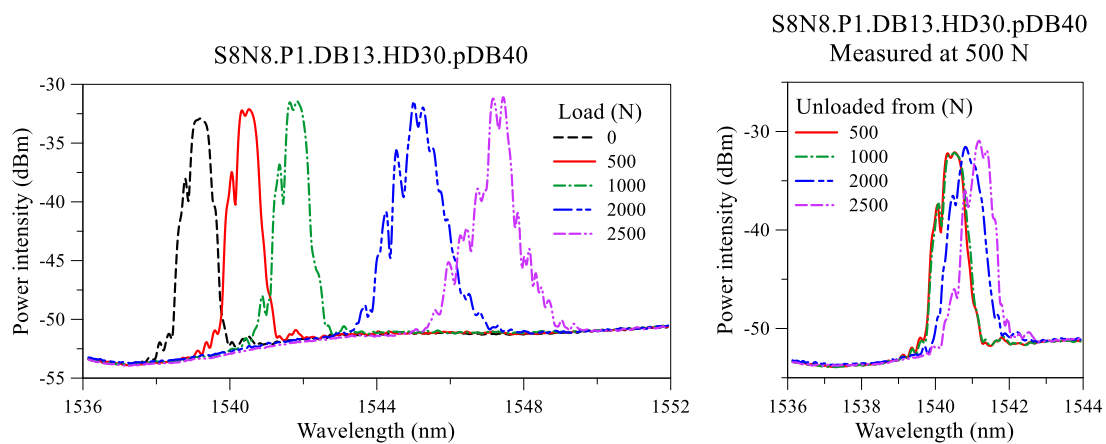
附圖 160 S7N1 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



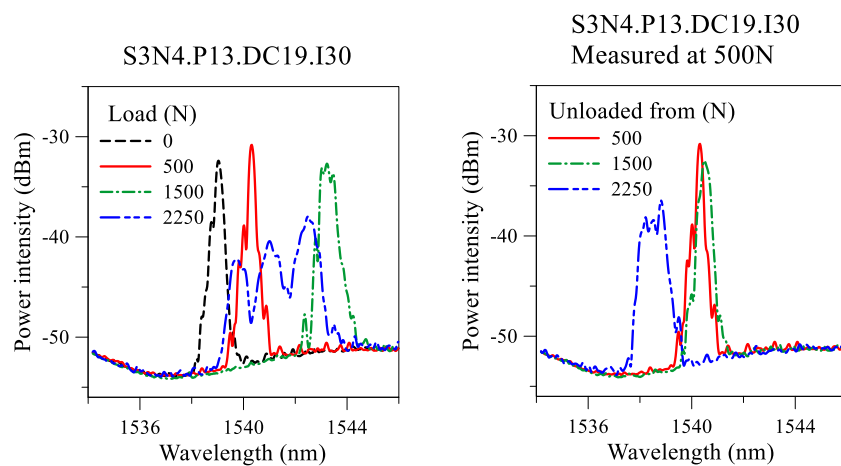
附圖 161 S8N2 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



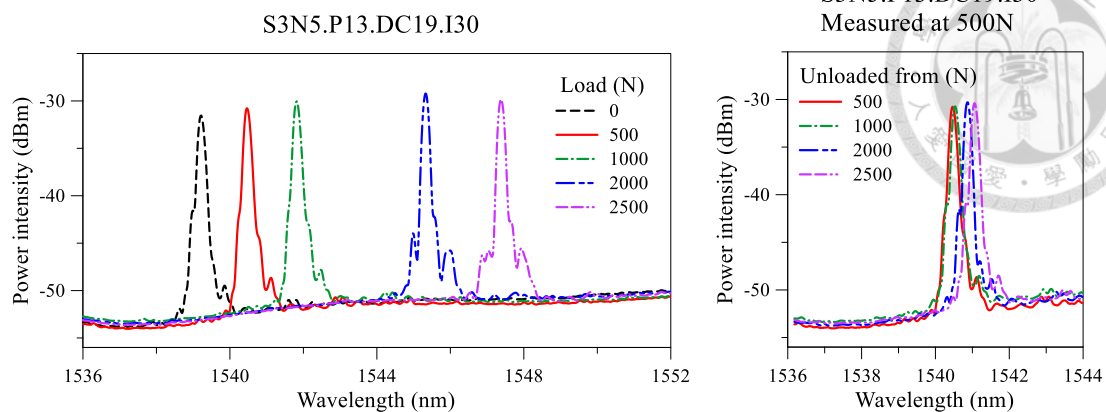
附圖 162 S8N1 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



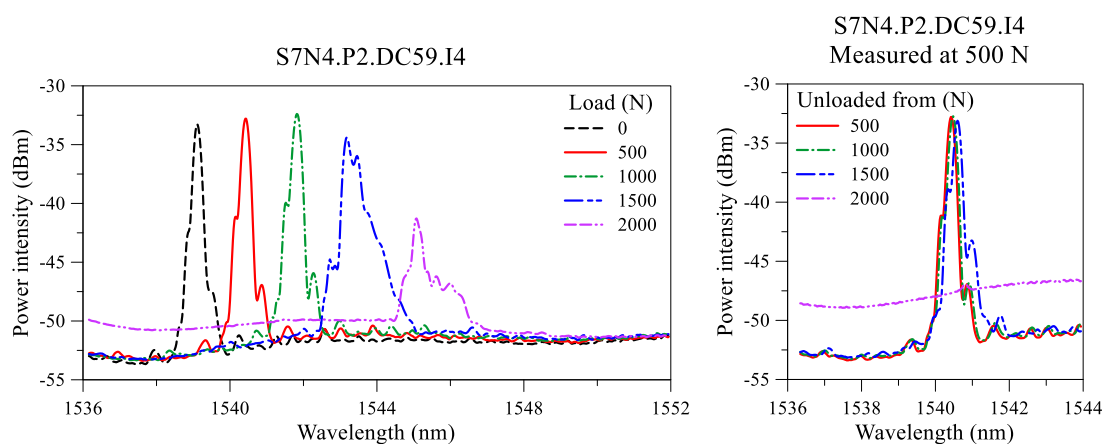
附圖 163 S8N8 高溫低濕後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



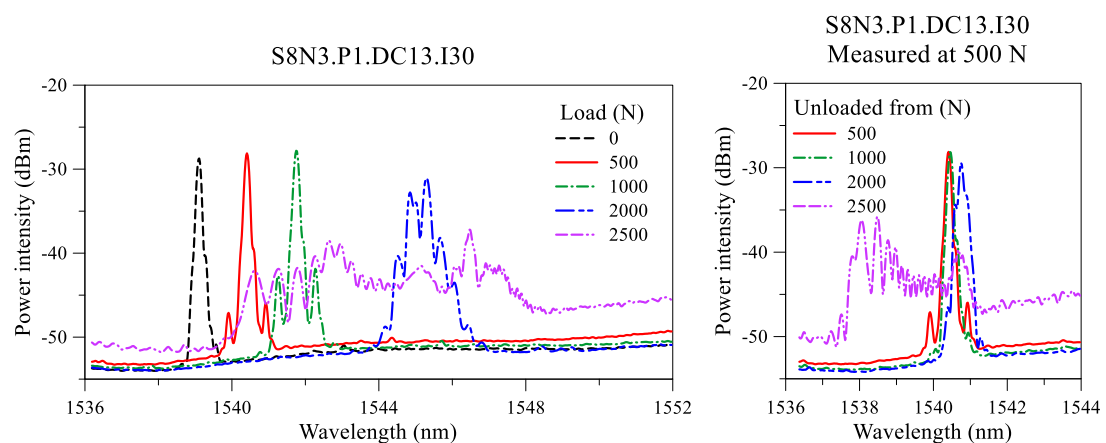
附圖 164 S3N4 浸泡熱水後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



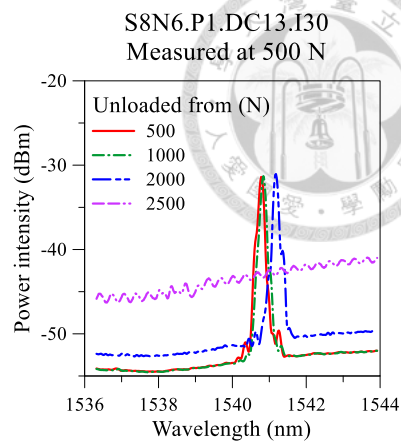
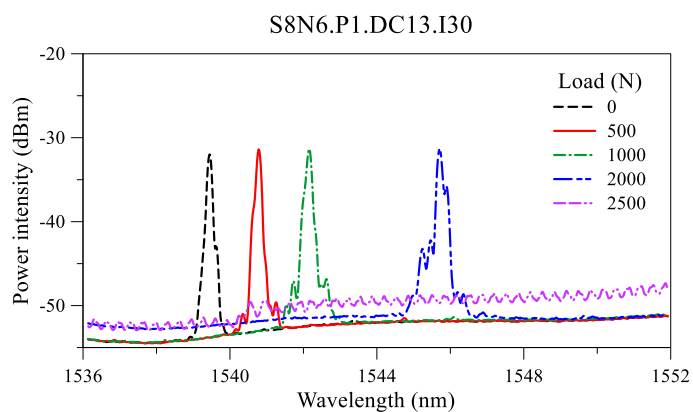
附圖 165 S3N5 浸泡熱水後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



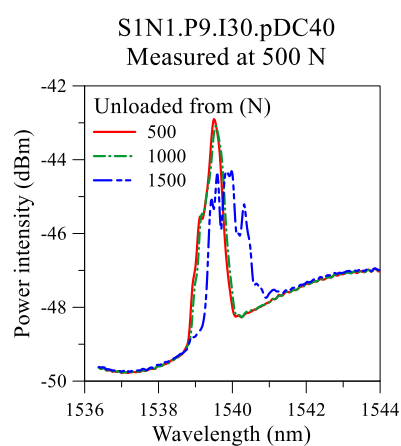
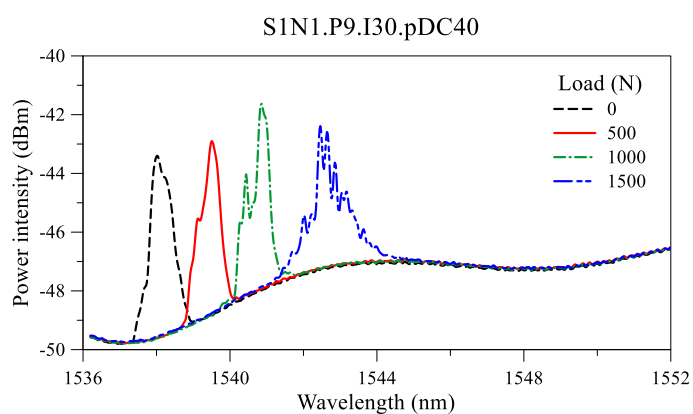
附圖 166 S7N4 浸泡熱水後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



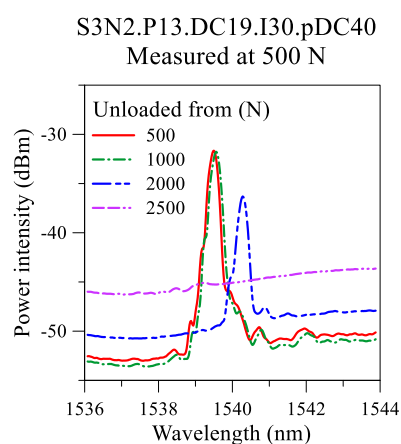
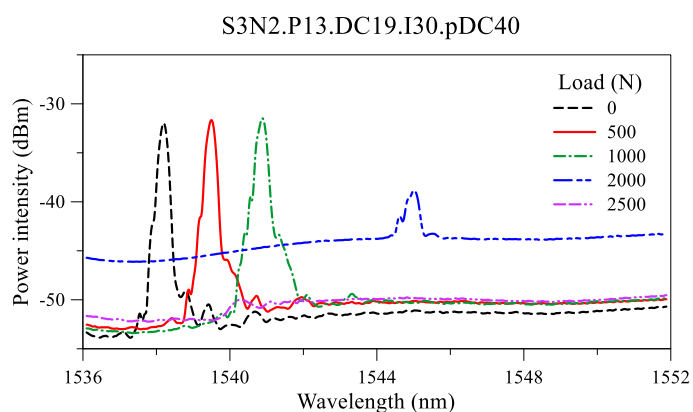
附圖 167 S8N3 浸泡熱水後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



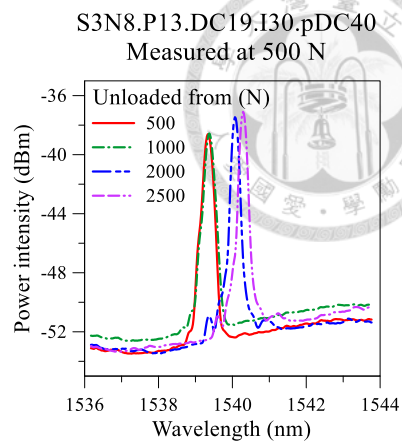
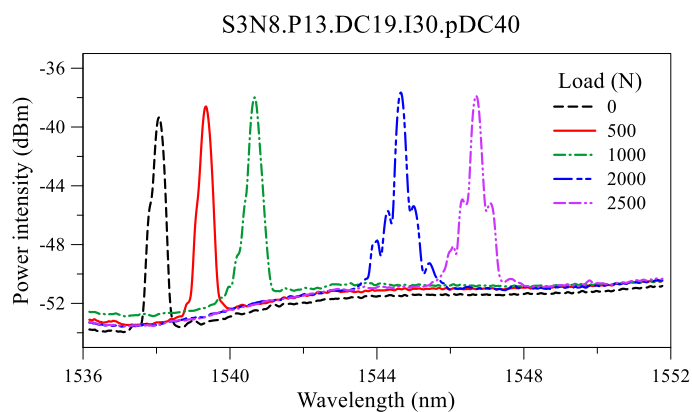
附圖 168 S8N6 浸泡熱水後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



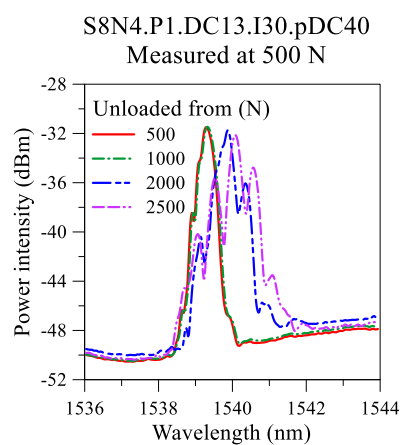
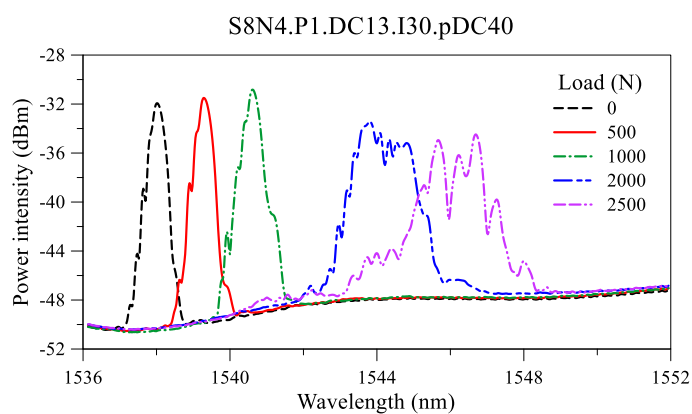
附圖 169 S1N1 浸泡熱水又乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



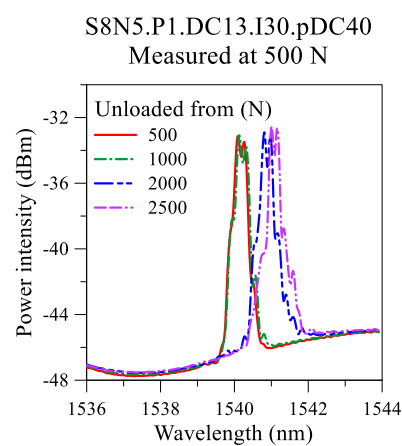
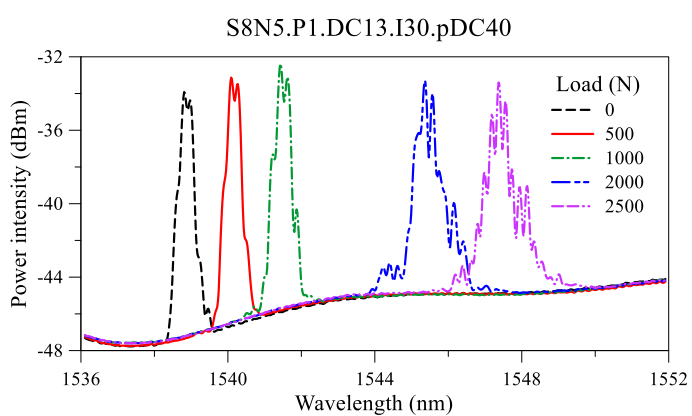
附圖 170 S3N2 浸泡熱水又乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



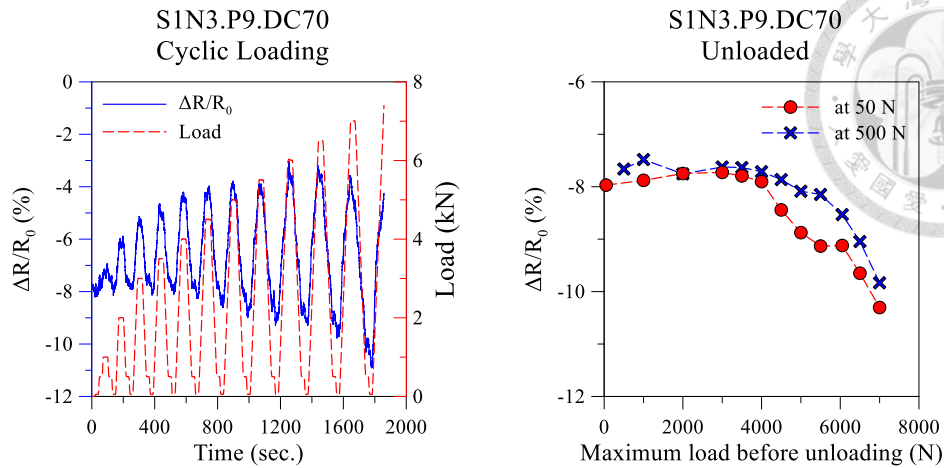
附圖 171 S3N8 浸泡熱水又乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



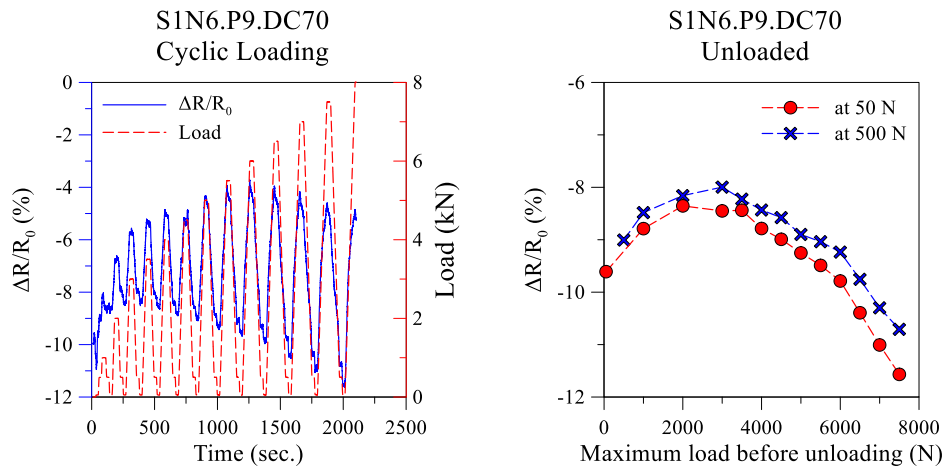
附圖 172 S8N4 浸泡熱水又乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



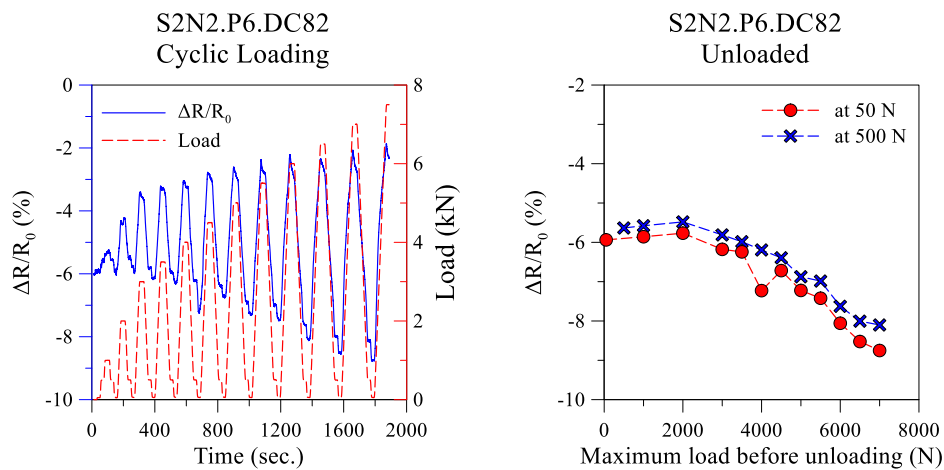
附圖 173 S8N5 浸泡熱水又乾燥後拉伸頻譜變化：(左)不同負載；(右)卸載回 500 N



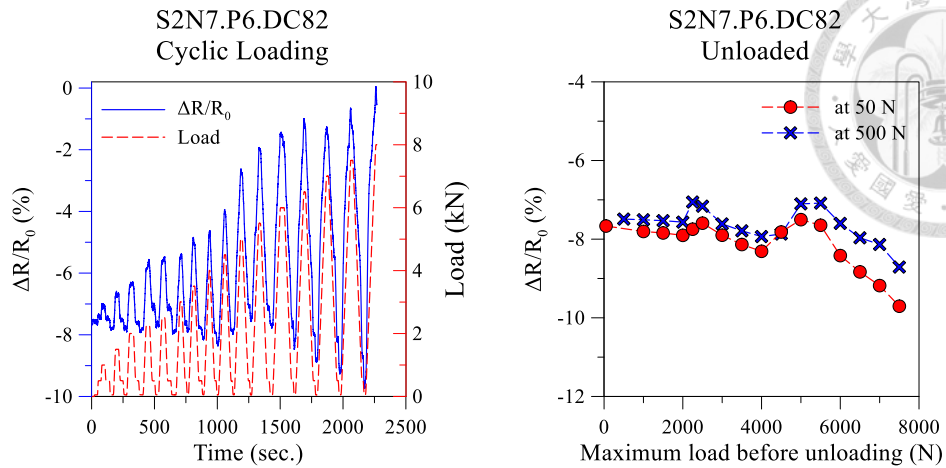
附圖 174 S1N3 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



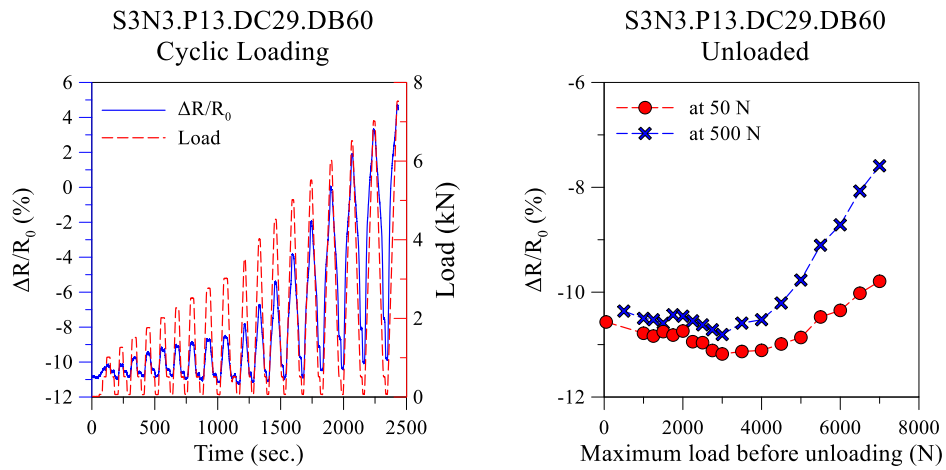
附圖 175 S1N6 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



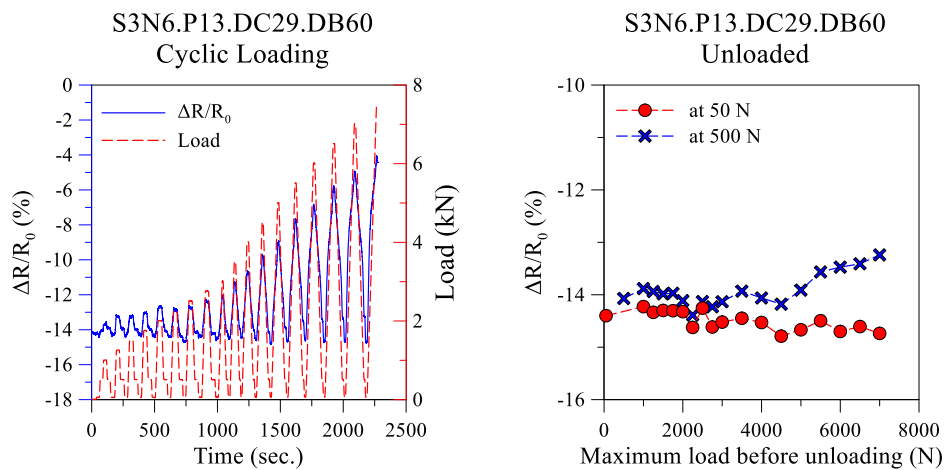
附圖 176 S2N2 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



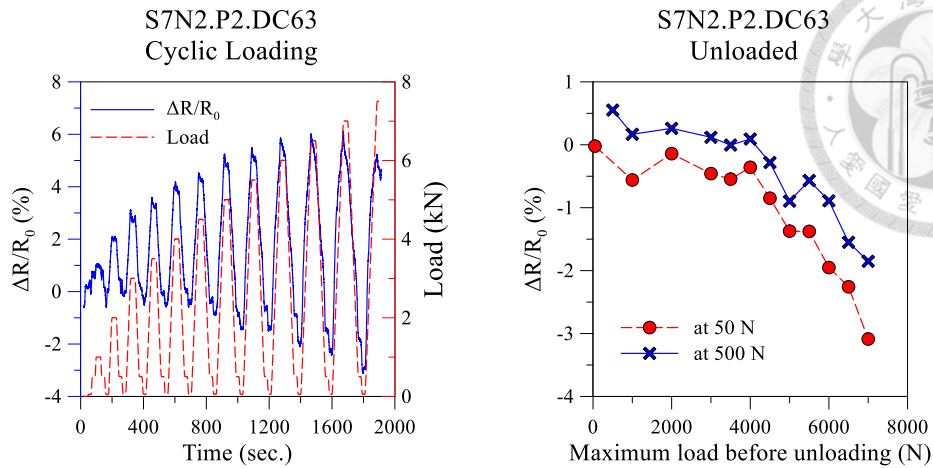
附圖 177 S2N7 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



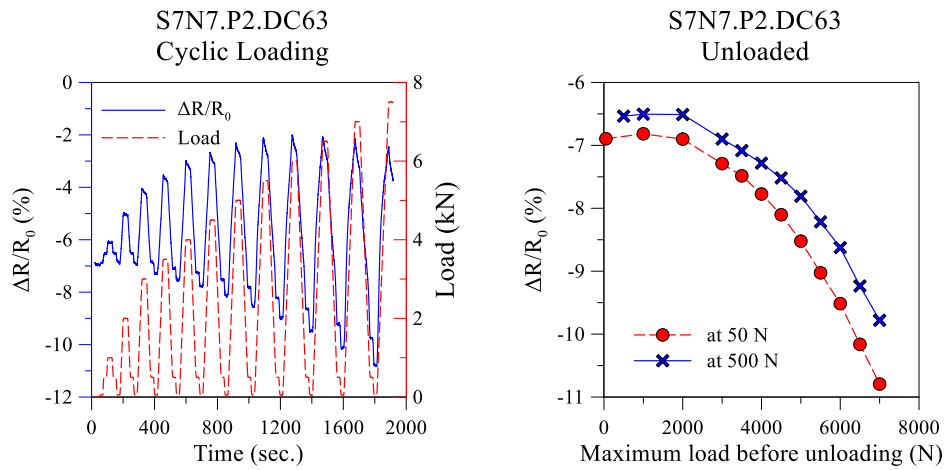
附圖 178 S3N3 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



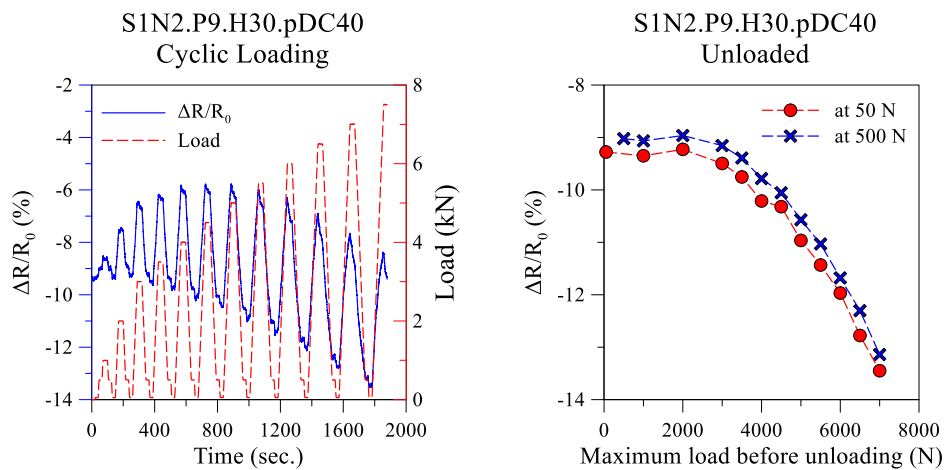
附圖 179 S3N6 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



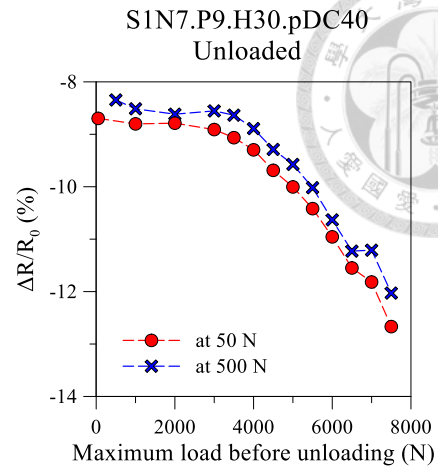
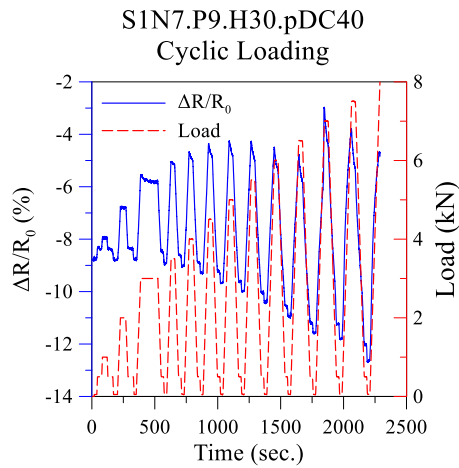
附圖 180 S7N2 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



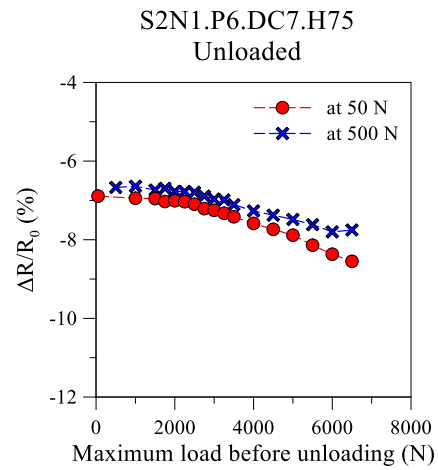
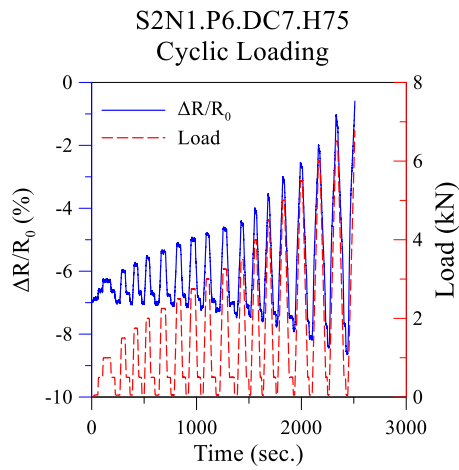
附圖 181 S7N7 乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



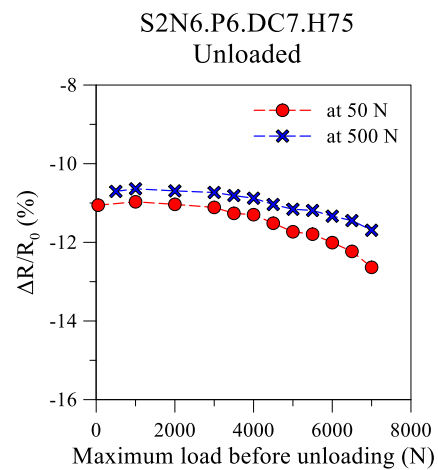
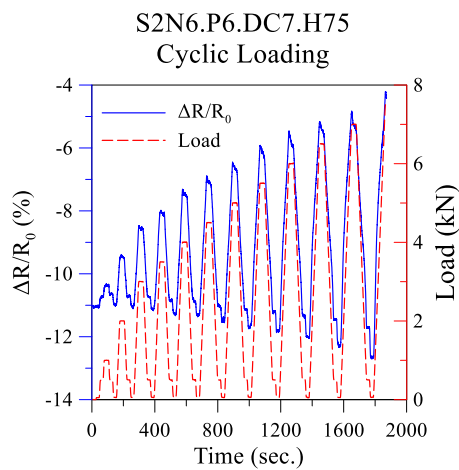
附圖 182 S1N2 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



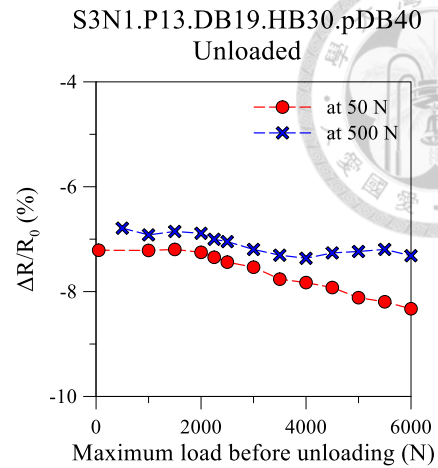
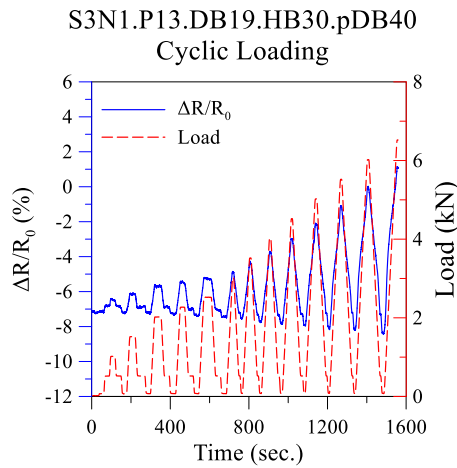
附圖 183 S1N7 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



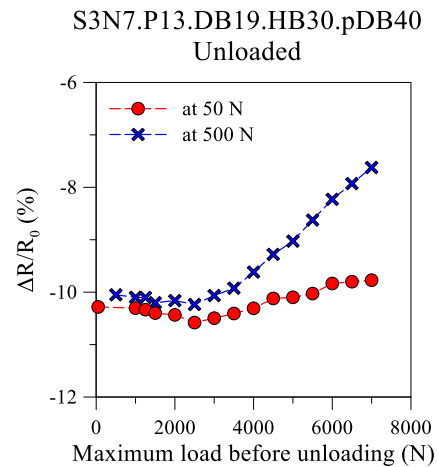
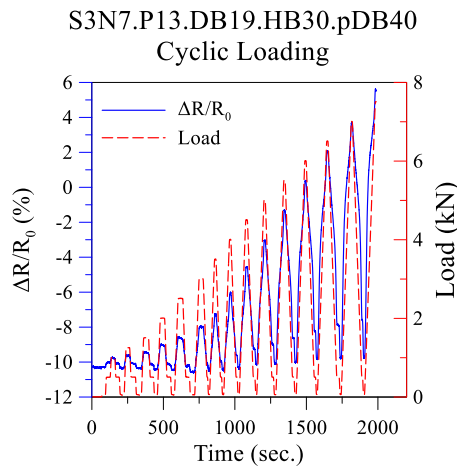
附圖 184 S2N1 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



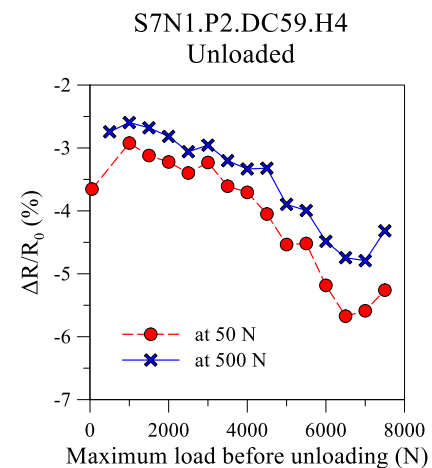
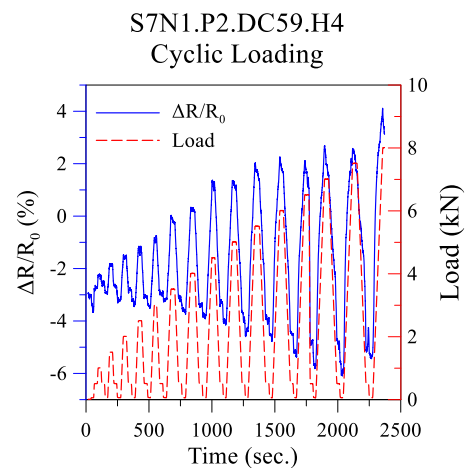
附圖 185 S2N6 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



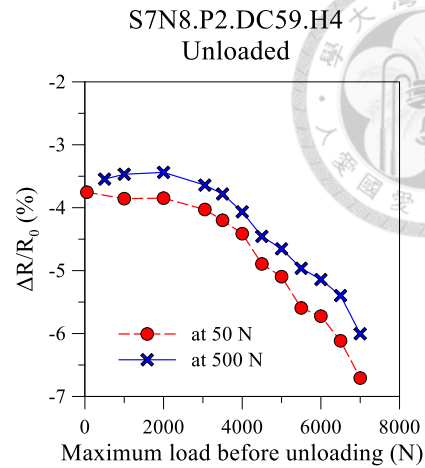
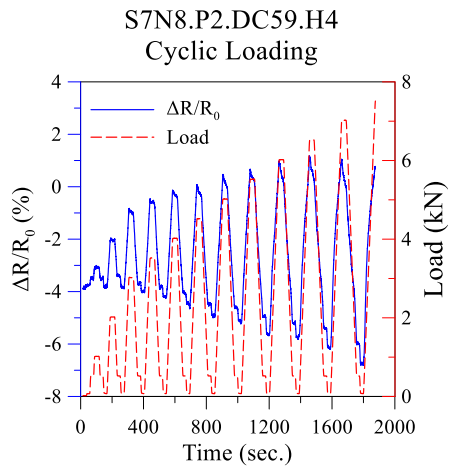
附圖 186 S3N1 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



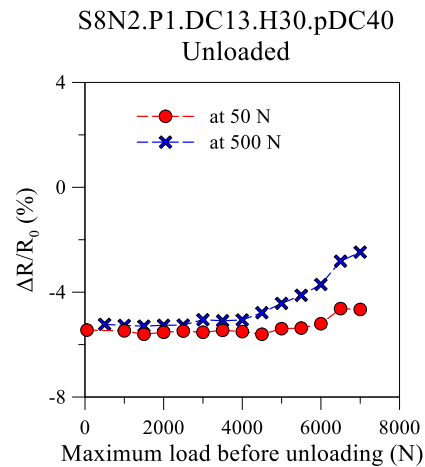
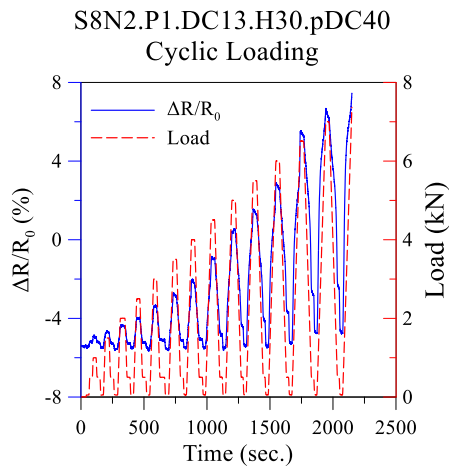
附圖 187 S3N7 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



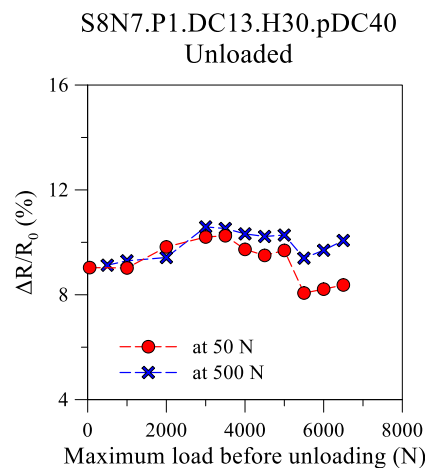
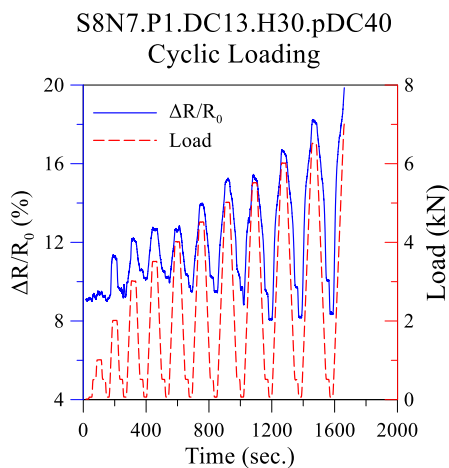
附圖 188 S7N1 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



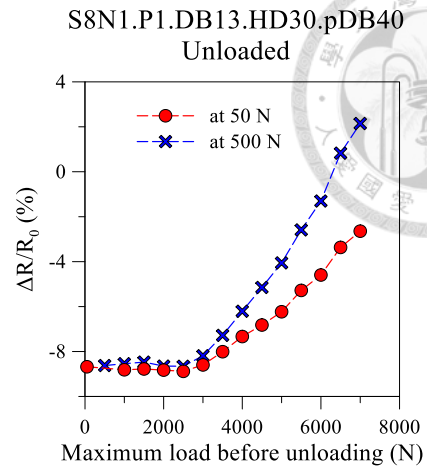
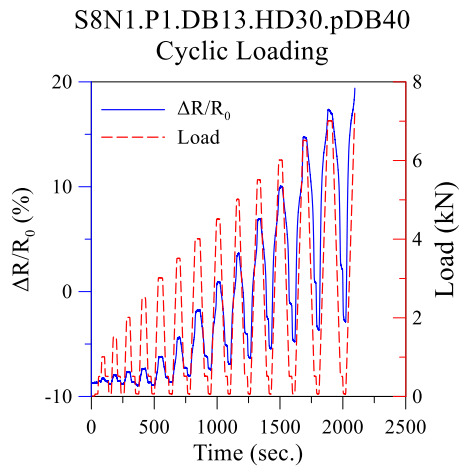
附圖 189 S7N8 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



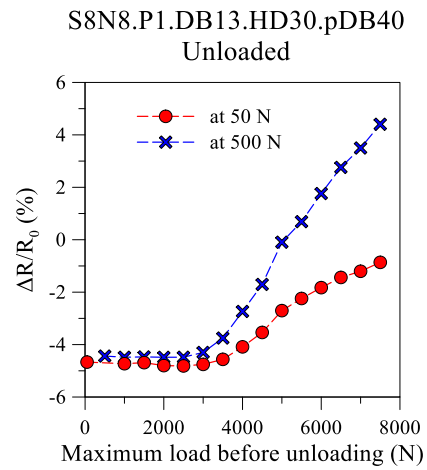
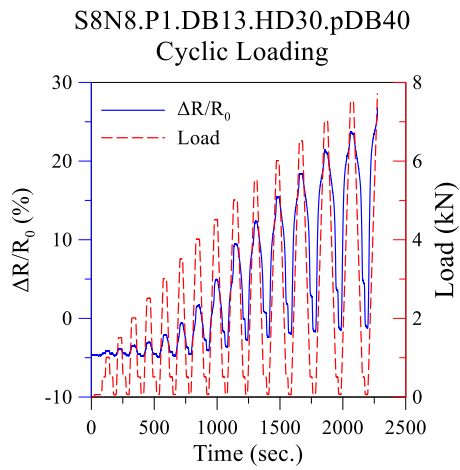
附圖 190 S8N2 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



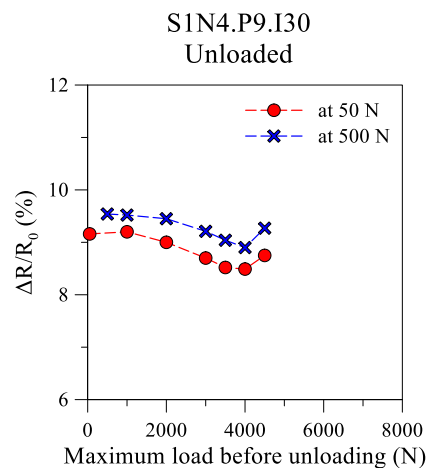
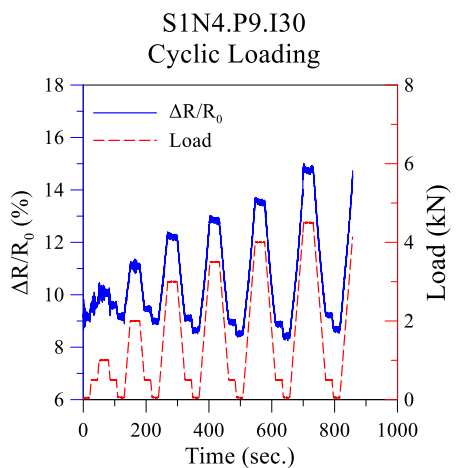
附圖 191 S8N7 高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



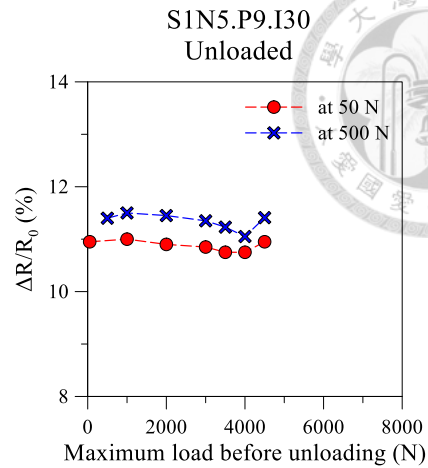
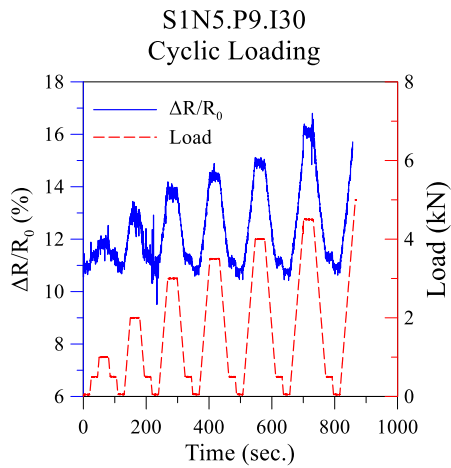
附圖 192 S8N1 乾燥袋中高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



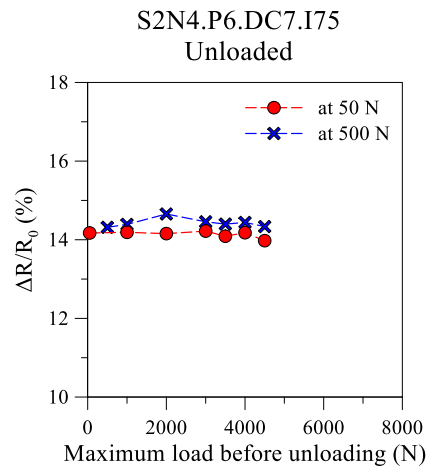
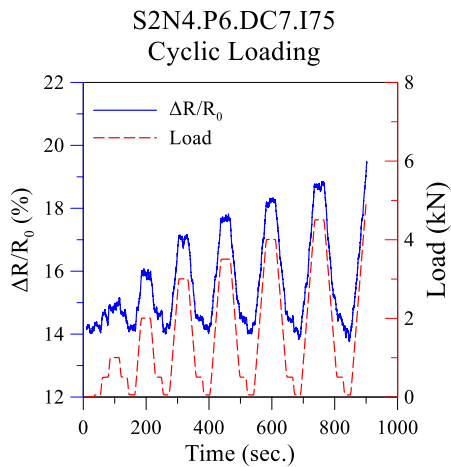
附圖 193 S8N8 乾燥袋中高溫低濕後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



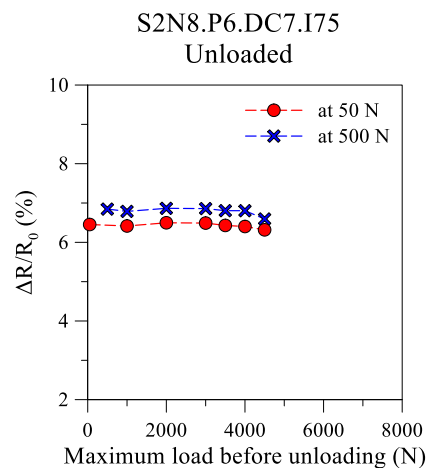
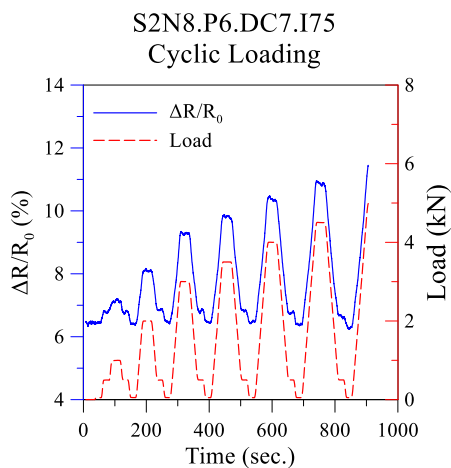
附圖 194 S1N4 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



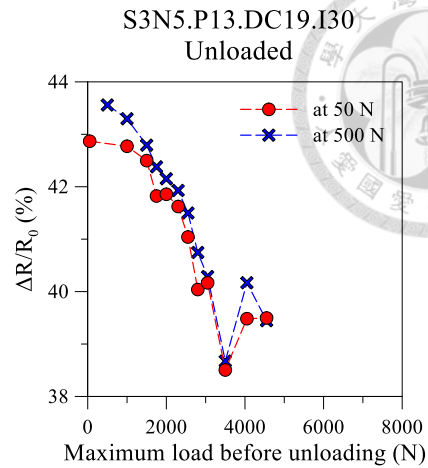
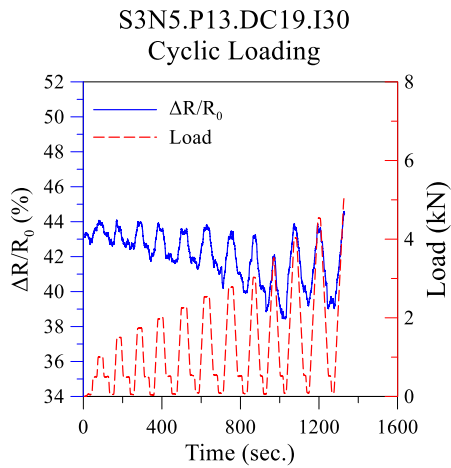
附圖 195 S1N5 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



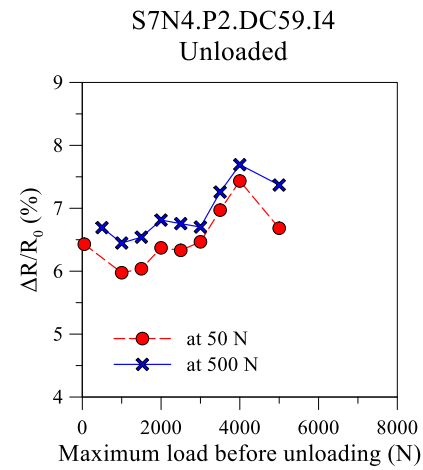
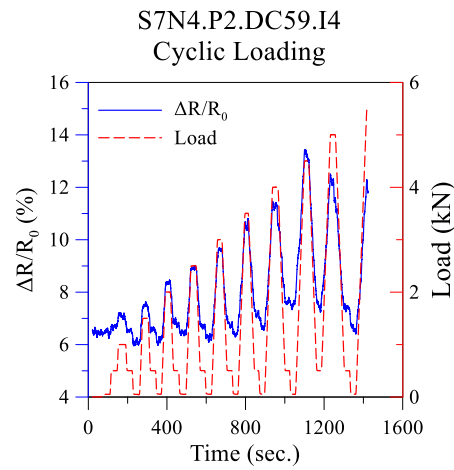
附圖 196 S2N4 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



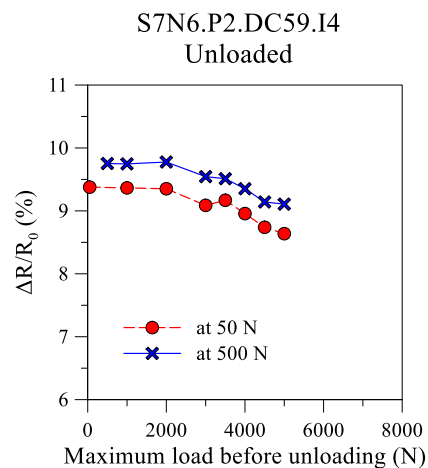
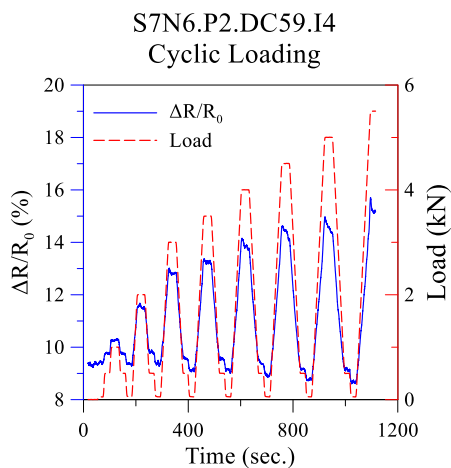
附圖 197 S2N8 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



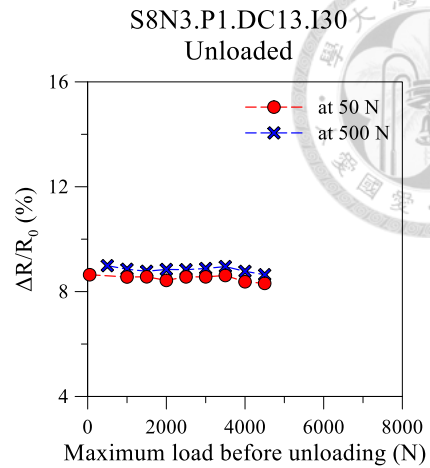
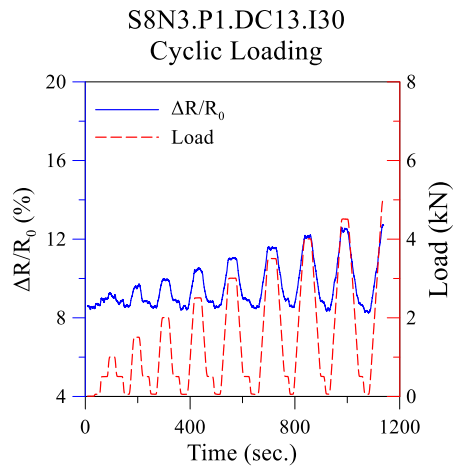
附圖 198 S3N5 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



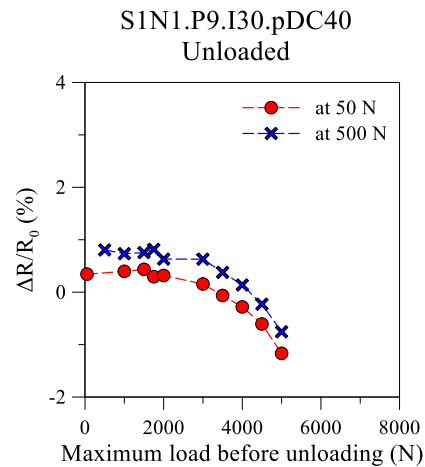
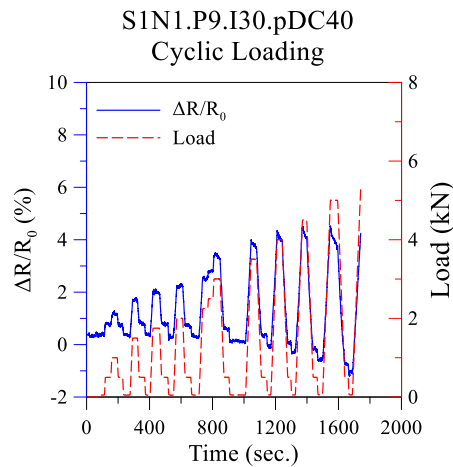
附圖 199 S7N4 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



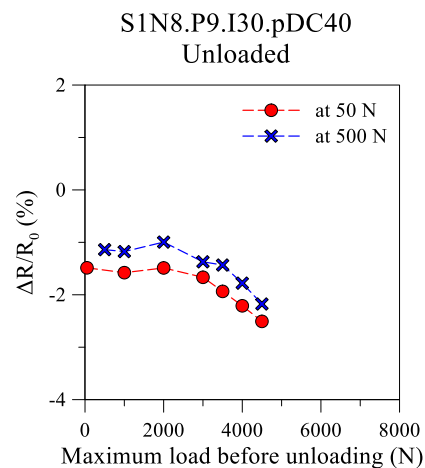
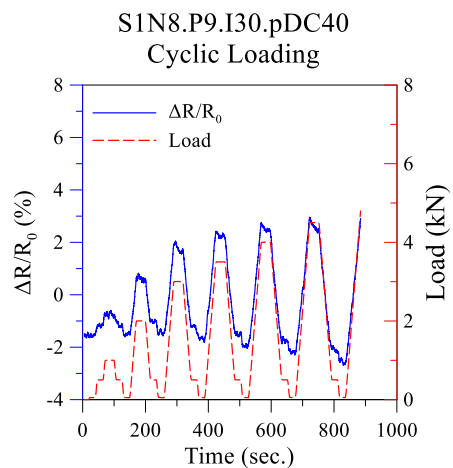
附圖 200 S7N6 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



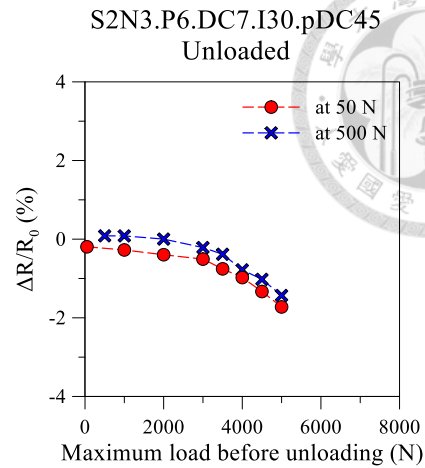
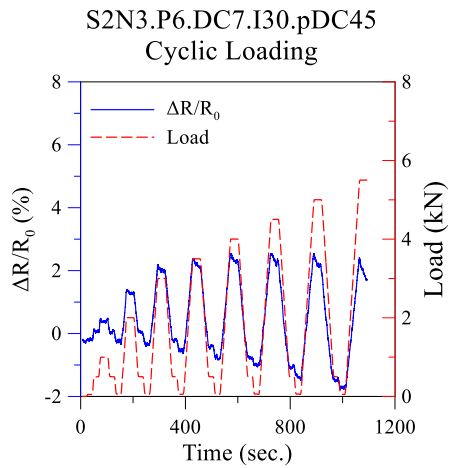
附圖 201 S8N3 浸泡熱水後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



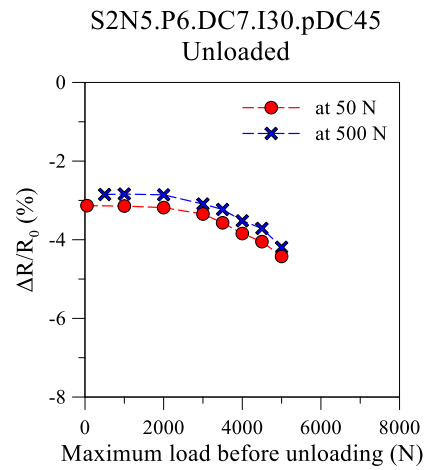
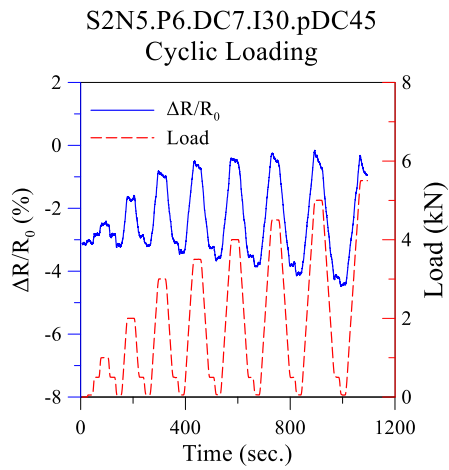
附圖 202 S1N1 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



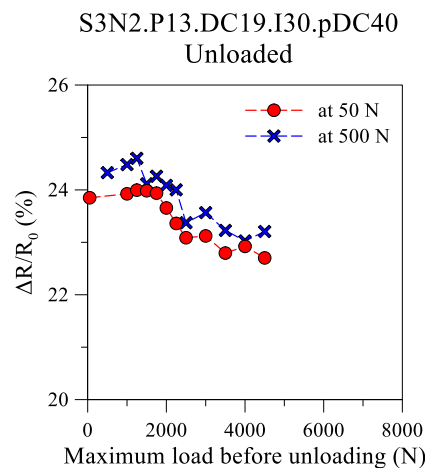
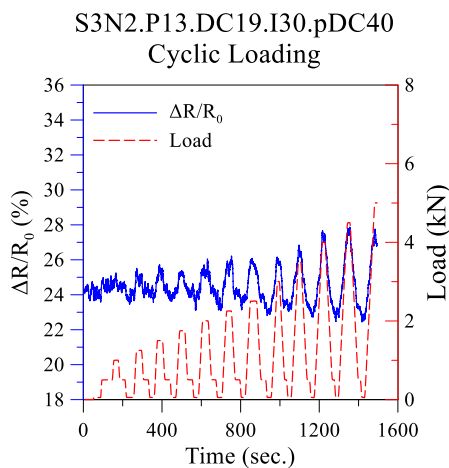
附圖 203 S1N8 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



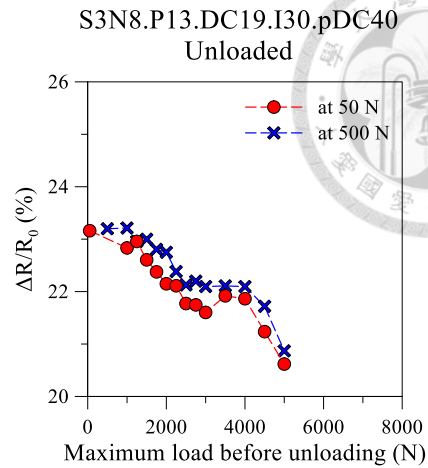
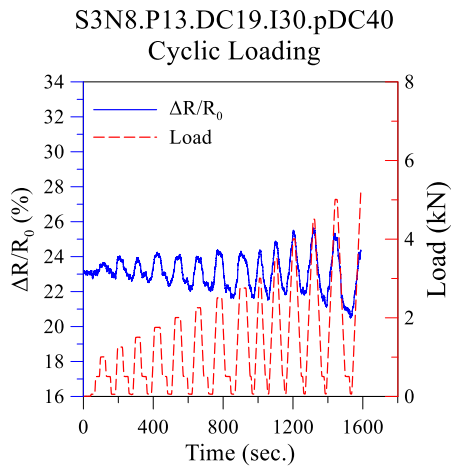
附圖 204 S2N3 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



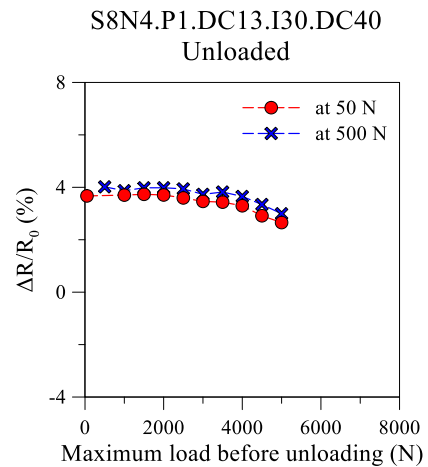
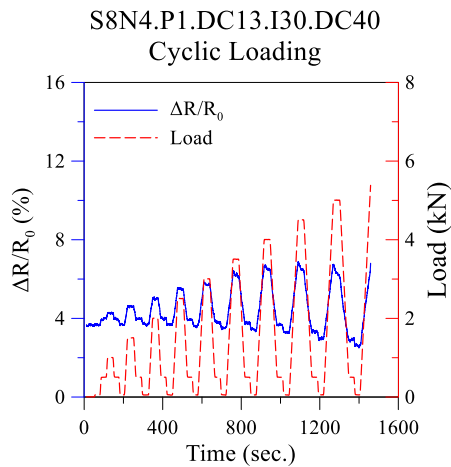
附圖 205 S2N5 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



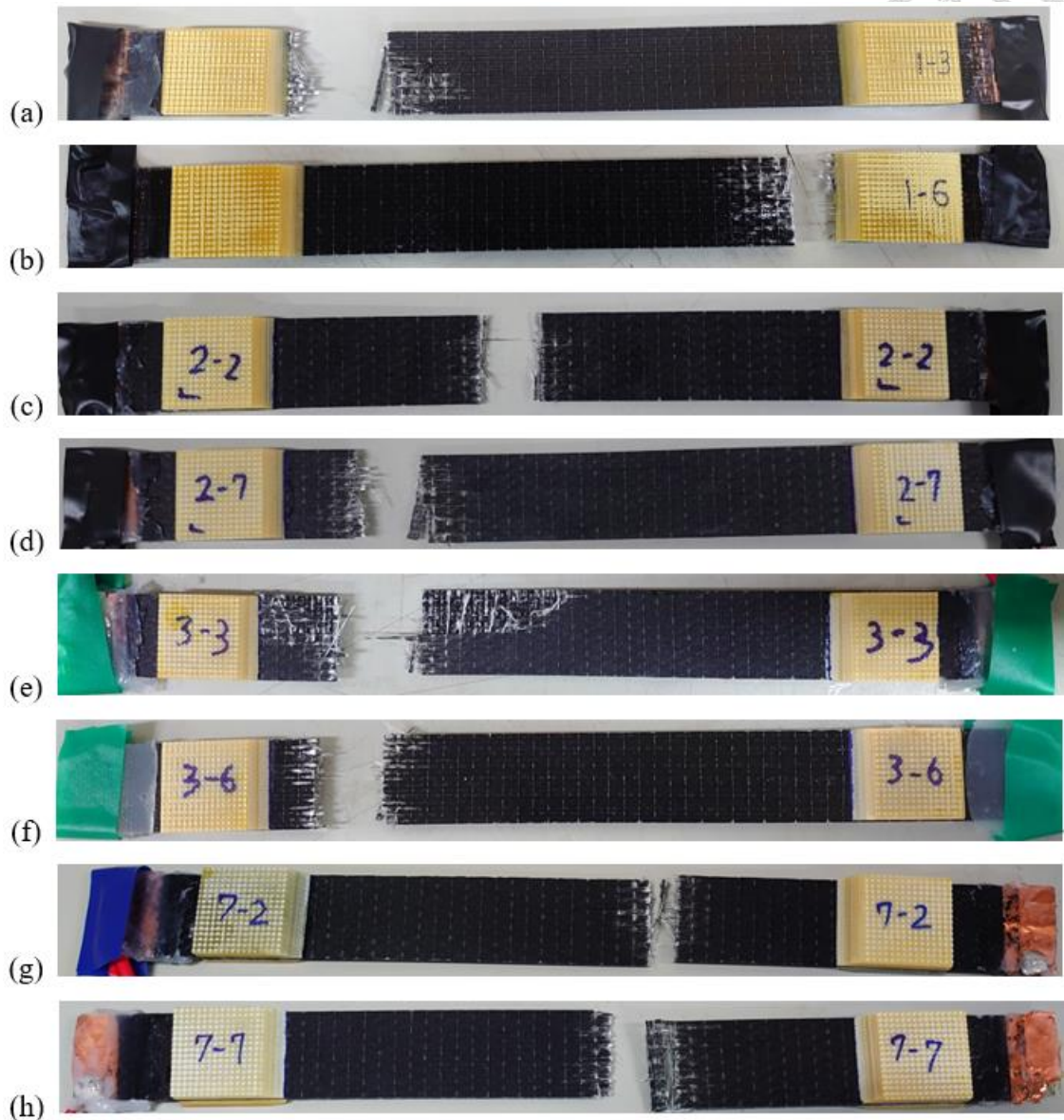
附圖 206 S3N2 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



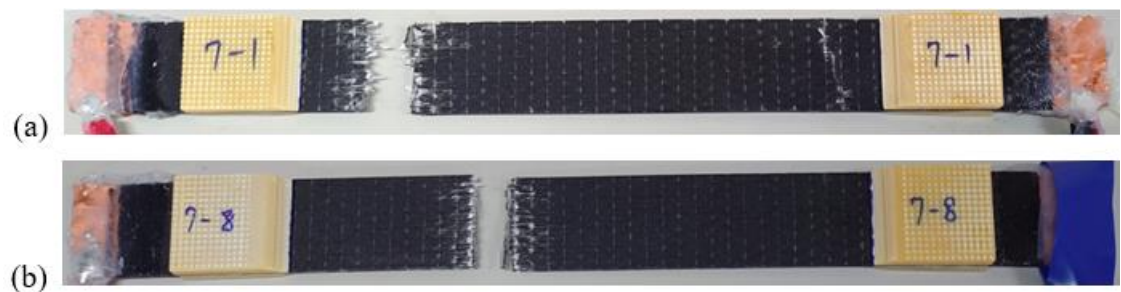
附圖 207 S3N8 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



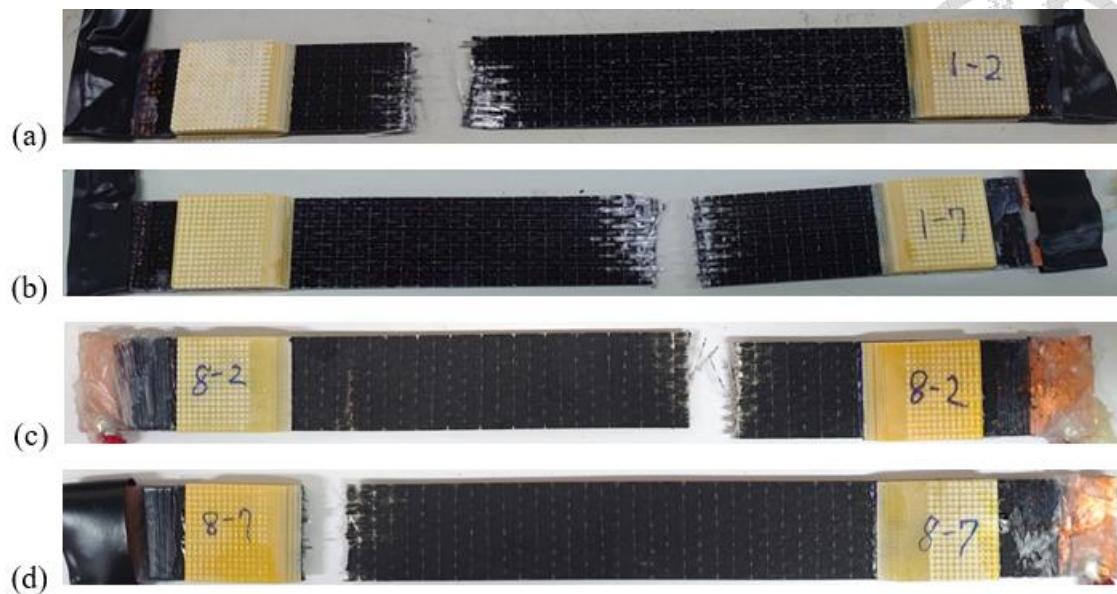
附圖 208 S8N4 浸泡熱水又乾燥後拉伸電阻變化：(左)拉伸期間；(右)卸載



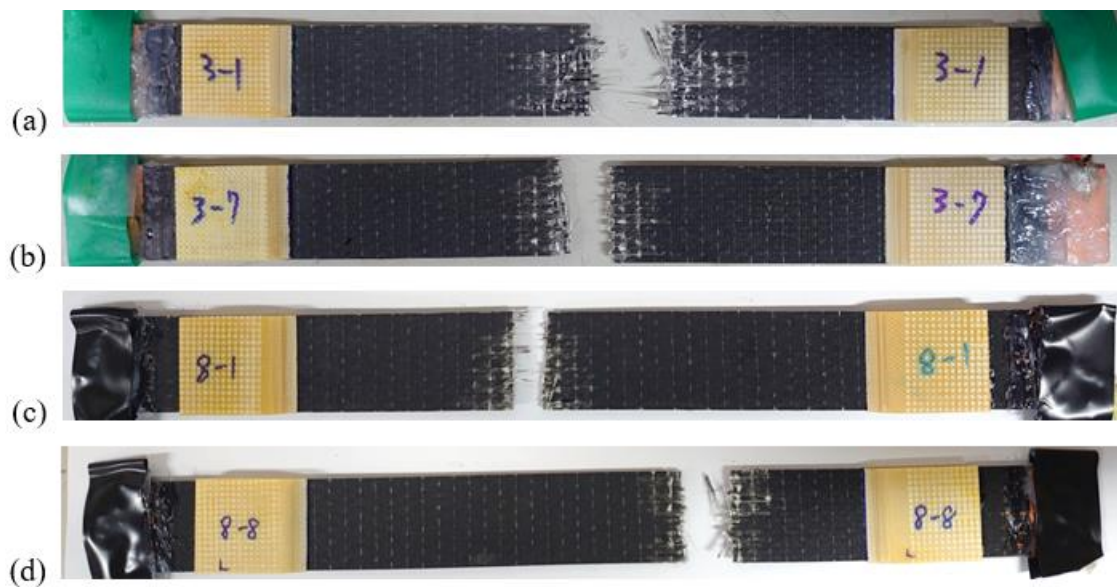
附圖 209 僅乾燥處理試片拉伸破斷外觀：(a)S1N3；(b)S1N6；(c)S2N2；
(d)S2N7；(e)S3N3；(f)S3N6；(g)S7N2；(h)S7N7



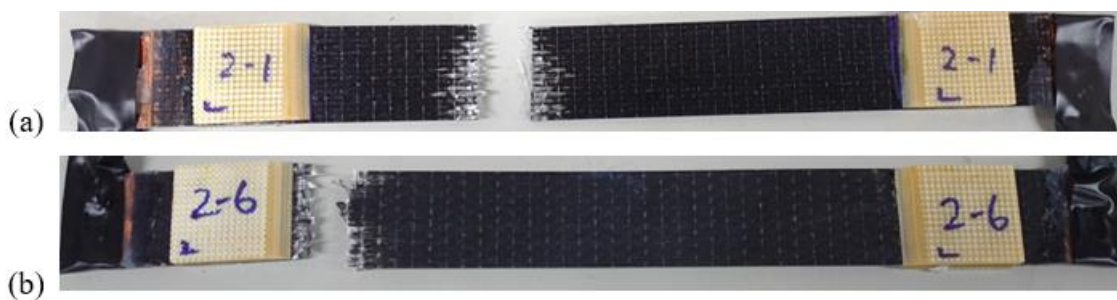
附圖 210 高溫低濕 4 天試片拉伸破斷外觀：(a)S7N1；(b)S7N8



附圖 211 高溫低濕 30 天試片拉伸破斷外觀：(a)S1N2；(b)S1N7；(c)S8N2；
(d)S8N7



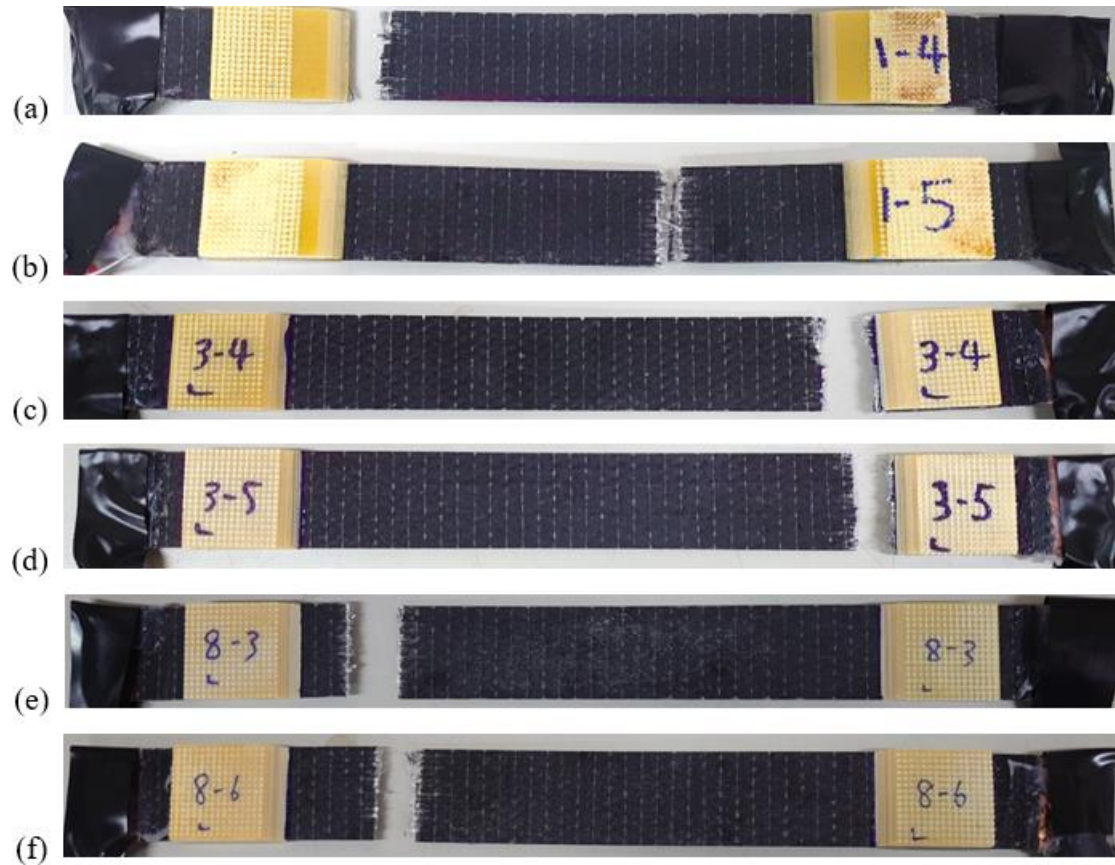
附圖 212 乾燥袋中高溫低濕 30 天試片拉伸破斷外觀：(a)S1N2；(b)S1N7；
(c)S8N2；(d)S8N7



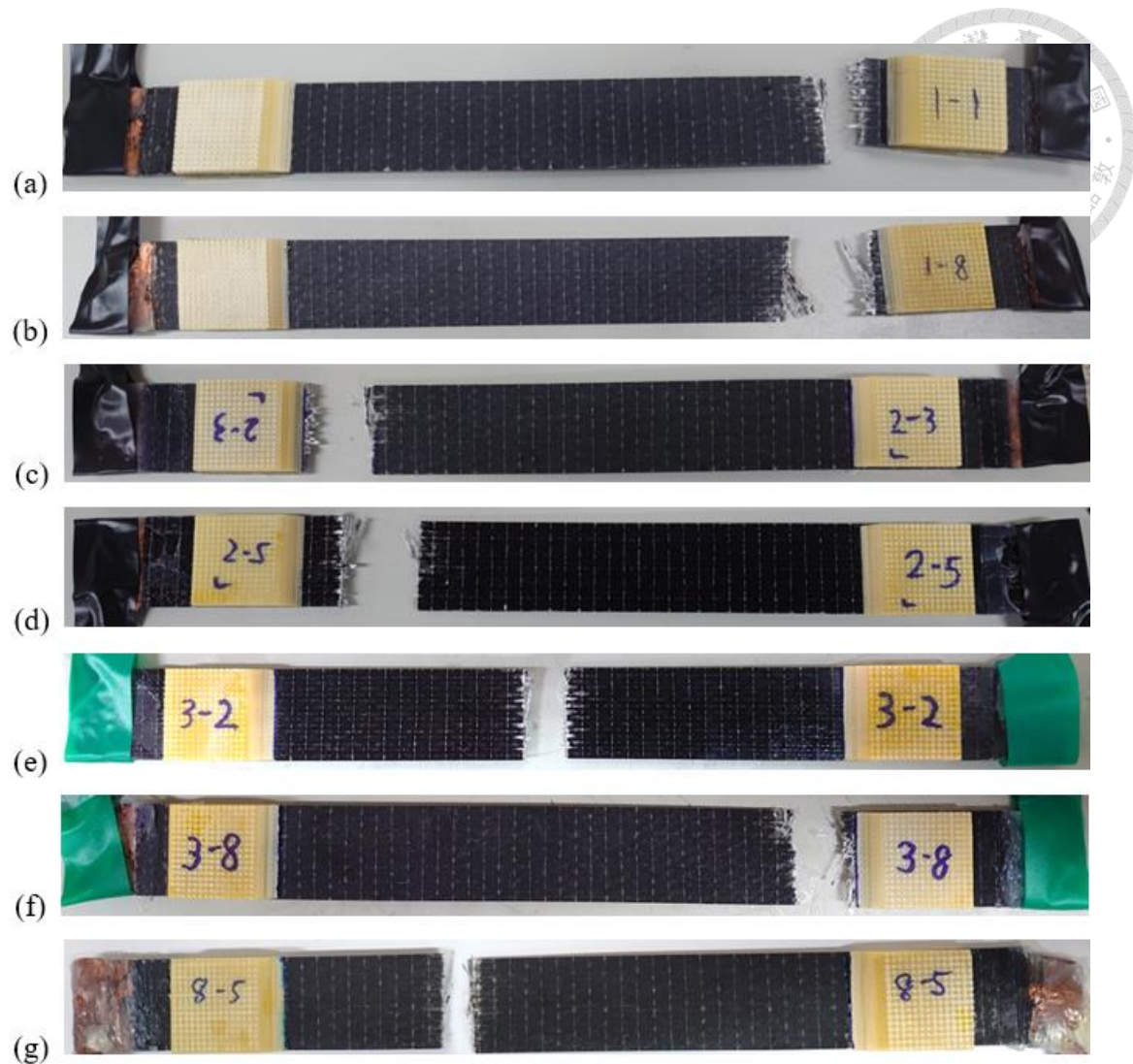
附圖 213 高溫低濕 75 天試片拉伸破斷外觀：(a)S2N1；(b)S2N6



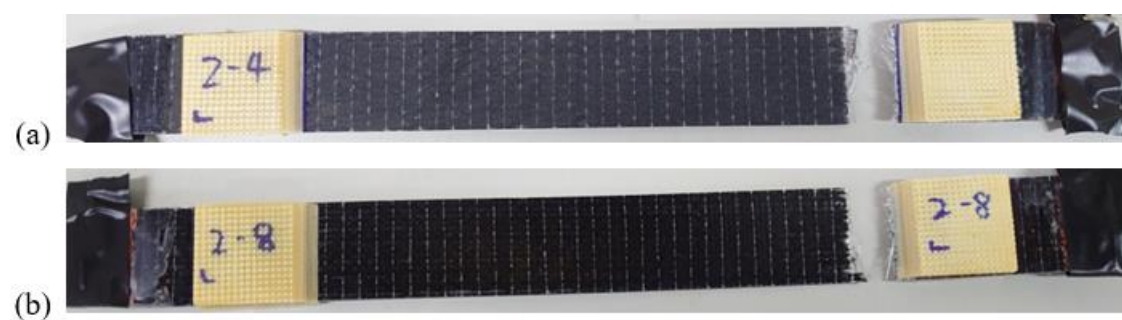
附圖 214 浸泡熱水 4 天試片拉伸破斷外觀：(a)S7N4；(b)S7N6



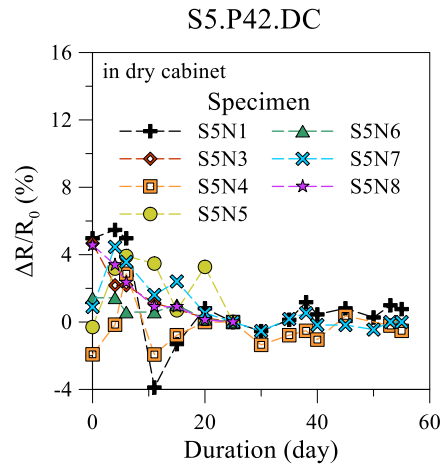
附圖 215 浸泡熱水 30 天試片拉伸破斷外觀：(a)S1N4；(b)S1N5；(c)S3N4；
(d)S3N5；(e)S8N3；(f)S8N6



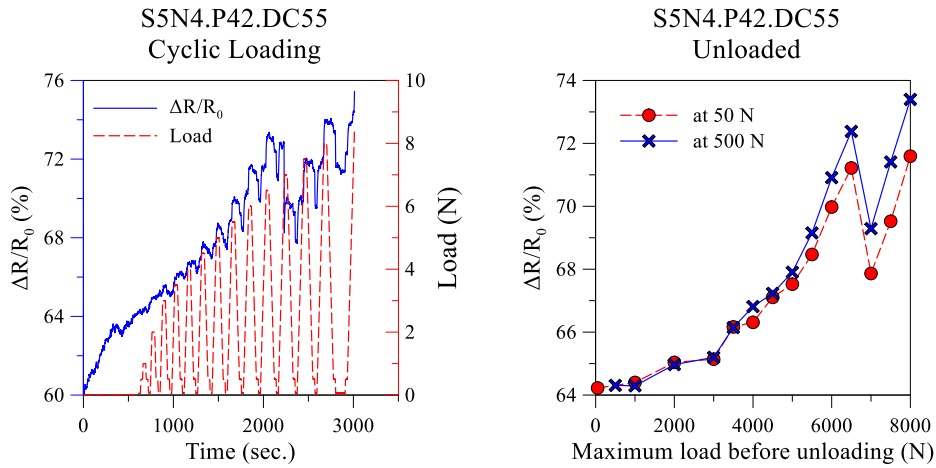
附圖 216 浸泡熱水 30 天又乾燥試片拉伸破斷外觀：(a)S1N1；(b)S1N8；
(c)S2N3；(d)S2N5；(e)S3N2；(f)S3N8；(g)S8N5



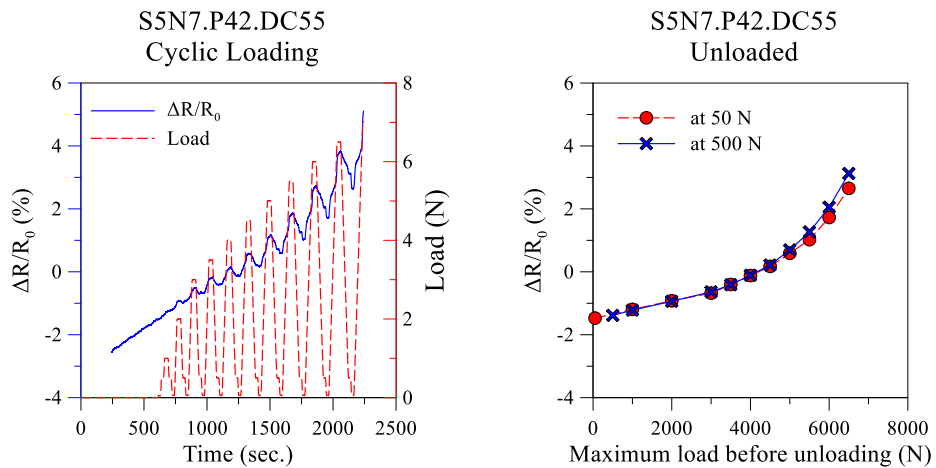
附圖 217 浸泡熱水 75 天試片拉伸破斷外觀：(a)S2N4；(b)S2N8



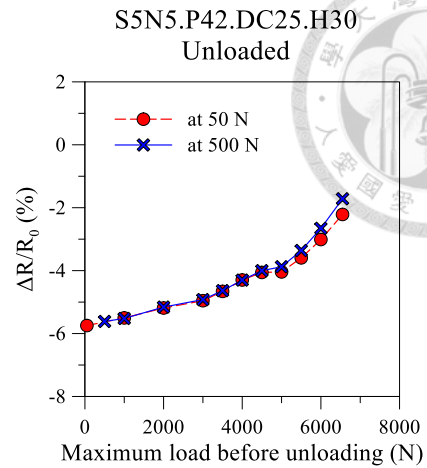
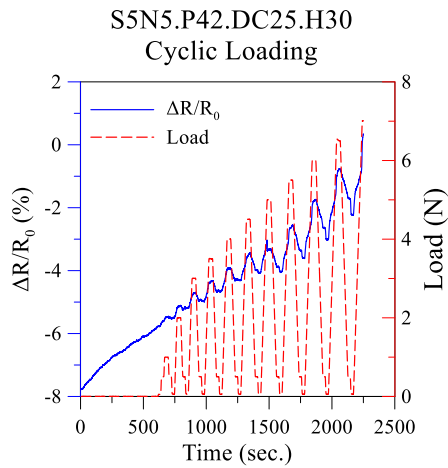
附圖 218 S5 乾燥期間電阻變化



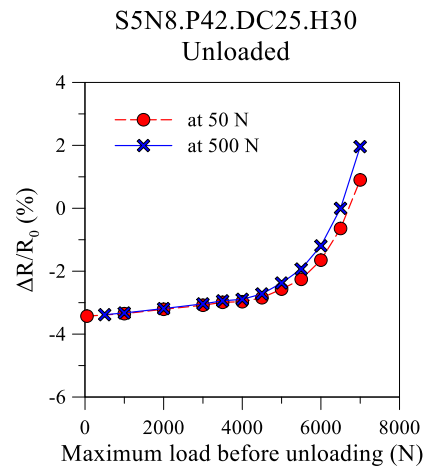
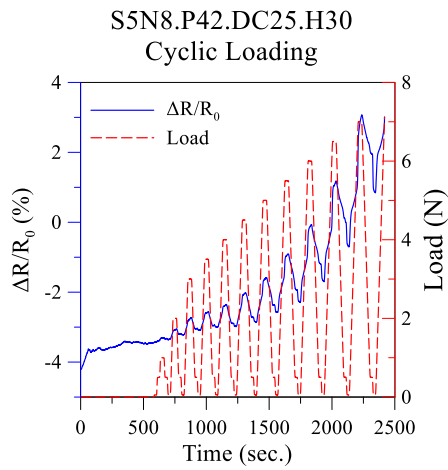
附圖 219 S5N4 乾燥後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載



附圖 220 S5N7 乾燥後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載



附圖 221 S5N5 高溫低濕 30 天後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載



附圖 222 S5N8 高溫低濕 30 天後循環拉伸電阻變化：(左)過程；(右)卸載