

國立台灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

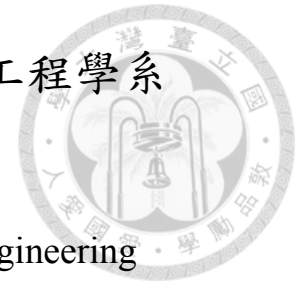
碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



海水老化與外力頻率於玻璃纖維複合材料疲勞特性之探討

**Frequency and water immersion aging effect in fatigue
performance of fiber reinforced composites**

劉百育

Pai-Yu Liu

指導教授：黃心豪 博士

Advisor: Hsin-Haou Huang, Ph.D.

中華民國 107 年 1 月

January, 2018

口試委員會審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

海水老化與外力頻率於玻璃纖維複合材料疲勞特性之
探討

Frequency and water immersion aging effect in fatigue
performance of fiber reinforced composites


本論文係劉百育君 (R04525001) 在國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系完成之碩士學位論文，於民國 107 年 1 月 10 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

(指導教授)

系主任

致謝



在研究所求學期間，我要特別感謝我的指導教授黃心豪老師，不論在研究、做人、人生都給了我許多的幫助及指引，即便過程中也曾有許多衝突與矛盾，但老師總是願意細心的叮嚀指導，讓我能夠冷靜的面對一切問題，細想起這兩年半中所發生的點點滴滴，覺得自己確實是收穫良多，研究上，老師願意讓我們不顧慮太多的去做自己的嘗試；做人上，老師端正了我的態度並使我改正了許多惡習，或許在老師眼中仍舊不足，但今後的路上必會記取老師這兩年半的教誨，使自己成為更好的人；人生上，老師無時無刻都在提醒我們做好人生規劃，常常分享自身的人生經歷讓我們參考，這種亦師亦友的相處方式，為本以為會十分煩悶的研究所生活，添上了不少有趣的色彩，在此想誠懇的向老師說：謝謝您的教誨，我一定會時刻提醒自己。

另外，本文的完成須要感謝邱逢琛教授與科技部計畫編號 106-3113-E-002-002-CC2 浮游式黑潮發電先導機組設計開發關鍵技術之研究的支持，讓我可以再實驗操作上面盡量的去嘗試，不用顧慮太多經費的問題，在此，想再次感謝邱老師與科技部的付出。

實驗室的同学，大家雖然涉足的領域有所差異，但當有問題時仍然願意彼此提供幫助，給予許多良好的意見，讓我受益良多；另外，特別要感謝高中及大學的摯友，軒宇、王麗、文記、柏丞、君彥、柏沛、冠凱、湯傑、兆洋、穎璇，謝謝你們總是願意在我困頓的時後，給予我信心及力量，讓我能夠勇往直前的面對所有問題，願大家能夠永遠保留著這份友情，緣起不滅。其餘在一路上幫助過我的人，只恨紙短情長，恕無法一一列出，但仍衷心感謝你們給予的幫助，謝謝。

最後，我必須感謝我的家人，謝謝爸爸、媽媽和哥哥對我的付出，出生至今，給您們造成的困擾一定遠大於其他孩子，也謝謝您們總是無條件的支持我的決定，讓我能夠自由的選擇自己人生的路，感謝您們。

中文摘要

隨著海洋能源開發技術的發展，擁有黑潮資源的台灣也已開始著手於相關技術研發，然而，台灣海洋能源開發技術剛起步而尚未成熟，尤其目前仍未有深水環境下，漂浮式渦輪發電機組運作的實例，許多流場、結構相關之議題仍尚待釐清，因此，建立適當的模擬與實驗，預先掌握黑潮渦輪發電機組的狀況及疲勞年限，實有其必要性。

本文以實驗的方式，探討台灣大學團隊所設計的黑潮渦輪發電機組複合材料葉片的疲勞性質。首先，利用 SCRIMP 製程製作黑潮渦輪發電機葉片設計疊層之複合材料試片，並透過高溫水浴的方式，模擬黑潮渦輪機組葉片在海水下運作 20 年後的老化情況，再利用 MTS 810 材料試驗機進行三點彎曲的擬靜態試驗，得到此疊層下之複合材料所能承受之極限應力，並根據極限應力百分比進行疲勞試驗。疲勞試驗中，探討老化、外力頻率與溫度對於複合材料疲勞壽命之影響，了解材料疲勞特性，根據本研究的結果顯示，老化後的試片破壞形式會有所改變，頻率的升高會使溫度上升，導致複合材料疲勞壽命下有顯著的下降，然而，在進行有效降溫後發現，若能夠排除高頻率外力對材料造成的溫度效應，則複合材料的疲勞壽命將隨著外力頻率增加而有增加的趨勢，本文亦比較了疲勞壽命曲線與剛性衰減曲線，兩者均能提供不錯的預測。

關鍵詞：黑潮發電、複合材料、疲勞試驗、海水老化、疲勞壽命曲線。

ABSTRACT

With the development of marine energy technology, Taiwan, with the Kuroshio resources, has also started in the related technology research and development. However, Taiwan's marine energy technology has just started and not fully developed. In particular, there are no precedent of operating floating turbine generators in deepwater environments. Issues related to flow fields and structures remain uncertain. Therefore, it is necessary to establish appropriate simulation and experiment, as well as to predict the status and fatigue life of the floating Kuroshio turbine generators.

In this research, fatigue characteristics of composite blades of the Kuroshio turbine generator designed by the Taiwan University team is discussed experimentally. First, we used Seemann Composite Resin Infused Molding Process(SCRIMP) to fabricated the designed composite coupon of the turbine blade, and simulated the aging conditions of the blades of the Kuroshio turbine under seawater operation for 20 years through hot water bath. Three-point bending quasi-static test, carried out by MTS 810, to obtain the ultimate stress that the composite under this laminate can withstand, then Fatigue tests were performed according to the percentage of ultimate stress. In the fatigue test, aging, external force frequency and temperature effects on the fatigue life of the composite material are discussed. According to the results of this study, the damage form of the test composite coupon after aging will be changed. The increase of the frequency will cause the temperature rise, then resulting in a significant decrease in the fatigue life. However, after effective cooling, excluding the temperature effect caused by the high frequency on the material, the fatigue life of the composite tends to increase with the increase of the external force frequency. This paper also compares S-N curve with stiffness loss model, both of them can provide good predictions.

Keywords: Kuroshio turbine, composite material, fatigue test, seawater aging, S-N curve

目錄



口試委員會審定書	i
致謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	iv
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	x
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究背景	1
1.3 研究目的	4
1.4 重要性與貢獻	4
1.5 名詞對照與符號說明	5
1.5.1 中文名詞與英文翻譯對照表	5
1.5.2 符號說明	5
第 2 章 文獻回顧	7
2.1 複合材料	9
2.2 複合材料疲勞研究	11
2.3 材料老化研究	13
2.4 外力頻率研究	14
第 3 章 研究方法	16
3.1 研究流程	16
3.2 理論說明	16
3.2.1 疲勞壽命曲線(S-N curve)	17
3.2.2 剛性衰減模型(Stiffness loss model)	18
3.2.3 疲勞累積損傷理論(Fatigue cumulative damage)	20
3.2 實驗說明	21
3.3.1 複合材料說明	21

3.3.2 玻璃纖維複合材料板製作流程	24
3.3.3 加速老化	32
3.3.4 玻璃纖維複合材料試片尺寸與參考實驗規範	33
3.3.5 彎曲試驗與疲勞試驗說明	37
第 4 章 結果	39
4.1 彎曲試驗	39
4.2 疲勞試驗	43
4.2.1 2Hz 疲勞試驗結果	43
4.2.2 不同外力加載頻率之疲勞試驗結果	46
第 5 章 討論	48
5.1 試片強度	48
5.2 疲勞壽命	49
5.2.1 實驗值、S-N curve 與剛性衰減模型	49
5.2.2 疲勞破壞位置	51
5.2.3 降溫測試	52
5.2.4 降溫之疲勞試驗	55
第 6 章 結論與未來展望	59
6.1 結論	59
6.2 未來展望	60
參考文獻	62



圖目錄



圖 1-1 黑潮夏季(左)、冬季(右)流況[1].....	2
圖 1-2 Gulf Stream Turbine[2].....	3
圖 1-3 黑潮渦輪發電機葉片側視圖(左)、剖面圖(右).....	3
圖 2-1 波音 767 複材重量比例[8].....	7
圖 2-2 波音 787 材料重量比例[9].....	8
圖 2-3 軍用機材料比例[10].....	8
圖 2-4 複合材料假牙 A. PFC B. SFC [11].....	9
圖 2-5 基材破壞[13].....	9
圖 2-6 纖維斷裂[17].....	10
圖 2-7 纖維層間脫層破壞[20].....	10
圖 2-8 不同疊層方向[22].....	11
圖 2-9 不同疊層順序示意圖[26].....	11
圖 2-10 (a)複合材料與等向性材料損傷累積比較 (b)複合材料三階段破壞過程 [32, 39].....	13
圖 2-11 浸泡時間與破壞型式關係[44].....	14
圖 2-12 ASTM A723 鋼於外力頻率 1.5Hz 與 15Hz 之疲勞壽命曲線[50].....	15
圖 2-13 碳纖維複合材料於外力頻率 4Hz、40Hz 與 375Hz 的疲勞表現[53].....	15
圖 3-1 研究流程圖.....	16
圖 3-2 應力時域性訊號示意圖.....	17
圖 3-3 疲勞模數示意圖.....	18
圖 3-4 SCRIMP 製程配置圖.....	24
圖 3-5 清潔強化玻璃表面並於周圍黏貼膠泥.....	25
圖 3-6 玻璃纖維排列於強化玻璃.....	26
圖 3-7 離模布鋪設於玻璃纖維上方.....	26
圖 3-8 煞車系統與吸出管配置.....	27
圖 3-9 導流網配置.....	27
圖 3-10 前置處理完成圖.....	28
圖 3-11 真空磊與型號.....	28

圖 3-12 環氧樹脂規格.....	29
圖 3-13 環氧樹脂固化劑規格.....	30
圖 3-14 調配完成之樹脂基材.....	30
圖 3-15 樹脂基材灌注過程.....	31
圖 3-16 烘箱與型號.....	31
圖 3-17 試片完成圖.....	32
圖 3-18 老化試驗配置.....	33
圖 3-19 三點彎曲夾具圖.....	33
圖 3-20 三點彎曲試驗示意圖.....	34
圖 3-21 寬度厚度量測示意圖.....	34
圖 3-22 MTS-810 材料試驗機及實驗配置.....	38
圖 4-1 自製未老化之複合材料彎曲試驗力與位移圖.....	39
圖 4-2 自製未老化之複合材料彎曲試驗應力應變圖.....	40
圖 4-3 自製老化之複合材料彎曲試驗力與位移圖.....	41
圖 4-4 自製老化之複合材料彎曲試驗應力應變圖.....	41
圖 4-5 廠商製複合材料彎曲試驗應力應變圖.....	42
圖 4-6 廠商製複合材料彎曲試驗應力應變圖.....	42
圖 4-7 自製試片與廠商製試片破壞形式比較.....	43
圖 4-8 未老化試片實驗、S-N curve 與剛性衰減曲線.....	44
圖 4-9 試片 2-6 經 2500000 次循環後試片表面狀態.....	44
圖 4-10 老化試片疲勞試驗結果與 S-N curve.....	44
圖 4-11 老化試片實驗、S-N curve 與剛性衰減曲線.....	45
圖 4-12 未老化試片與老化試片 S-N curve 比較.....	45
圖 4-13 FLUKE Ti450.....	47
圖 4-14 不同頻率溫度變化及疲勞壽命關係.....	47
圖 5-1 未老化試片彎曲試驗破壞位置.....	48
圖 5-2 老化試片彎曲試驗破壞位置.....	48
圖 5-3 [48]所呈現結果.....	49
圖 5-4 高循環應力試片破壞位置.....	51

圖 5-5 較低循環應力試片破壞位置.....	51
圖 5-6 老化試片破壞位置.....	52
圖 5-7 冷卻槍.....	52
圖 5-8 6Hz 溫度變化.....	53
圖 5-9 10Hz 溫度變化.....	54
圖 5-10 冷卻試片溫度變化比較.....	55
圖 5-11 未老化試片降溫疲勞壽命與頻率關係.....	57
圖 5-12 老化試片降溫疲勞壽命與頻率關係.....	58



表目錄



表 3-1 實驗材料表.....	22
表 3-2 複合材料疊層資料.....	22
表 3-3 第一組試片尺寸.....	34
表 3-4 第二組試片尺寸.....	35
表 3-5 第三組試片尺寸.....	35
表 3-6 第四組試片尺寸.....	36
表 3-7 廠商試片尺寸.....	36
表 4-1 自製未老化之複合材料彎曲試驗結果.....	40
表 4-2 自製老化之複合材料彎曲試驗結果.....	41
表 4-3 廠商製複合材料彎曲試驗結果.....	43
表 4-4 未老化試片疲勞試驗結果.....	45
表 4-5 老化試片疲勞試驗結果.....	46
表 4-6 相同外力、不同外力加載頻率之疲勞壽命.....	46
表 5-1 試片比較表.....	48
表 5-2 未老化試片理論值與實驗結果誤差比較.....	50
表 5-3 老化試片理論值與實驗結果誤差比較.....	50
表 5-4 降溫測試實驗結果.....	53
表 5-5 降溫後 13.6Hz 疲勞壽命.....	55
表 5-6 相同循環應力及頻率下降溫與未降溫疲勞試驗比較.....	56
表 5-7 未老化試片循環應力 342MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	56
表 5-8 未老化試片循環應力 296MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	56
表 5-9 未老化試片循環應力 262MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	57
表 5-10 老化試片循環應力 330MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	57
表 5-11 老化試片循環應力 315MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	57
表 5-12 老化試片循環應力 280MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果.....	58

第1章 緒論



1.1 研究動機

本世紀，隨著各項科技蓬勃發展，全球碳排放量始終居高不下，為避免碳排放所造成的問題，各國均開始積極開發替代性的綠色能源。台灣身為地球村的一份子，亦不遺餘力的推動綠色能源的發展，根據 4C offshore 網站所統計世界各風場風速，全世界前 25 名最佳風場中，有 15 個區域位於台灣所屬的海域，因此，台灣確實具備了世界級的風場資源。此外，地理環境屬於島國的台灣，有流向固定且不隨季節轉換的洋流經過，四面環海的地理特性使我們具備了相當豐富的海洋能量資源，其中，流經台灣東部的黑潮中心流速約為 0.5 至 2.0 m/s，經台電公司初步調查，預計可以達到 3 GW 以上的能量，除了風力發電以外，相較於其他綠色能源，如：潮汐、波浪、溫差及鹽差能等週期型海洋能源，洋流能穩定提供的能量，為台灣具有開發潛能的綠色能源之一，而將洋流能擷取的轉換器就是洋流渦輪機組。然而，不同於風力發電葉片，洋流渦輪機組需長期於水下運作，葉片材料勢必因長期浸泡於海水中，使性質有所改變。因此，本文將針對目前黑潮洋流渦輪機組預期使用之玻璃纖維複合材料疊層進行研究，探討海水老化及外力頻率對於黑潮洋流渦輪機組葉片之影響，期望自己能夠為維護環境永續發展的願景，進一份棉薄之力。

1.2 研究背景

台灣東岸有黑潮通過，如圖 1-1 所示，黑潮為全世界第二大洋流，僅次於墨西哥灣流，自菲律賓始，穿越台灣東部海域，朝著日本往東北向流動，再與親潮相遇後，匯入東巷的北太平洋洋流。

黑潮寬度約 200 多公里，厚度約 500~1000 公尺，流速大約為 0.5~2.0 公尺/秒，流經台灣東部海域的黑潮，估計擁有每秒 20~40 百萬噸的巨大流量，黑潮若以平均流速 1.0(公尺/秒)計算，總平均功率估計可達 15.7 百萬千瓦；若以平均流速 1.5(公尺/秒)計算，則總平均功率估計可達 35 百萬千瓦。

黑潮被視為重要的海洋能源，其主要能源來自於水體流動的動能，因此其流速及流量是估計其總平均功率的重要參數，可由式 1 表示：



$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

其中， P 表示總平均功率， ρ 表示海水平均密度， v 為平均流速， A 為流體通過之截面積。

除了能源總量外，能量密度也與再生能源開發的可行難易度密切相關，於此特別值得一提的是，台灣地區所擁有的黑潮能源，具有流向不會隨著季節更動的優勢，如圖 1-1，使得開發可行的難易度降低了許多。就黑潮動能的能量密度而言，由於海水密度約為空氣密度的 868 倍(將因所處環境因素，如水溫、氣溫等等條件而略有差異)，因此相對於風力發電所能供給之能量，洋流發電可使用較低的速度達到相同的能量密度。以一般優良風場之平均風速 9.0(公尺/秒)做比較，根據錯誤! 找不到參照來源。計算可得，當黑潮平均流速達 0.94(公尺/秒)時，將與一般優良風場具備相同的能量密度。因此，流速介於 0.5~2.0(公尺/秒)的黑潮，確實具備了不亞於優良風場的高能量密度。

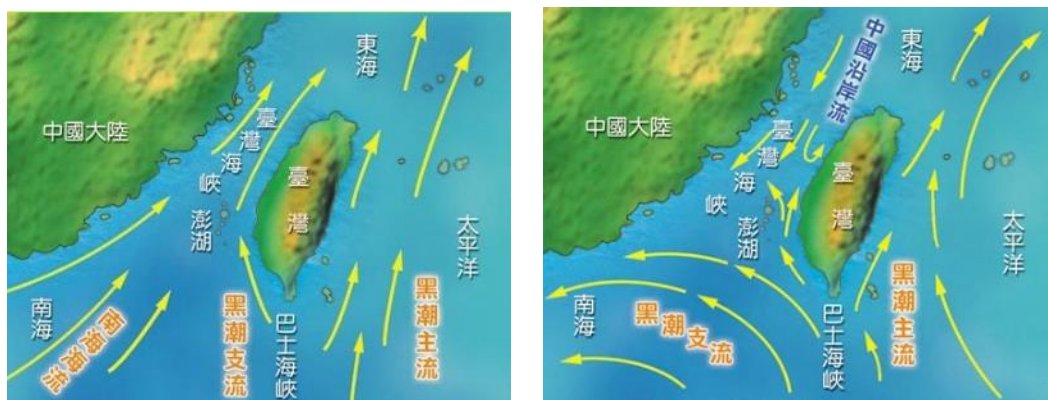


圖 1-1 黑潮夏季(左)、冬季(右)流況[1]

在美國有 J. Robson 針對洋流速度更高的墨西哥灣流能源利用而發明了 Gulf Stream Turbine，如圖 1-2 所示，該機組的設計和分析雖已有相當之成熟度，惟尚未有實機測試實績。

在日本，2008 年~2010 年期間日本財團法人機械振興協會(ENAA)發展百萬瓦級洋流發電機系統為目標的計畫，渦輪機葉片直徑 33 公尺環形葉片渦輪機之浮游式洋流發電系統概念，錨碇於 200 公尺水深，浮游於 50~100 公尺水深，於流速 2.5(公尺/秒)時，額定功率 2MW(百萬瓦)為目標規格。

由上述可知，國外已經投入洋流發電技術發展。考慮到未來會在台灣東部黑潮洋流位於水深較深的海域佈放，台灣東部深海域並不適合傳統著底式渦輪機，因其系統安裝及維修將相當困難，所以採用錨繫於海床且漂浮在適當水深下進行機組運轉的浮游式洋流渦輪機，較適合台灣東部深海域。

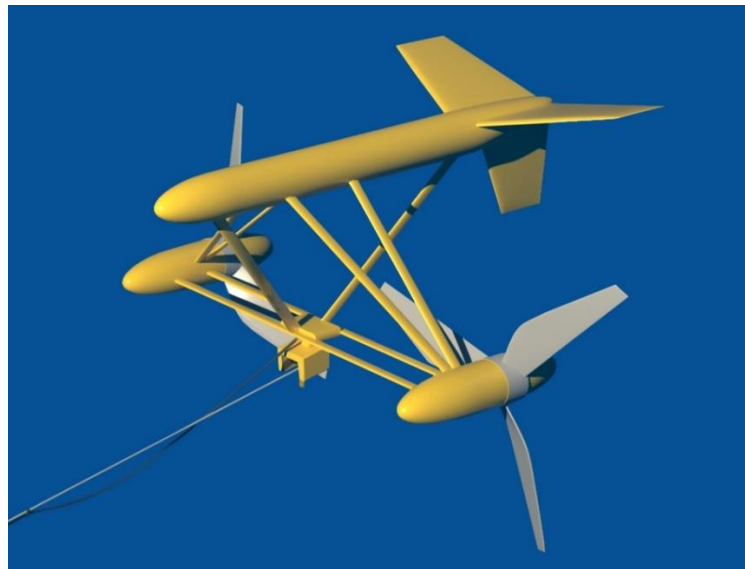


圖 1-2 Gulf Stream Turbine[2]

現行預期所使用於黑潮渦輪發電機的葉片，係由國立台灣海洋大學的辛敬業教授所設計[3]，外形如圖 1-3 所示，箭頭方向表纖維鋪設 0 度方向，整體是以玻璃纖維複合材料包覆芯材 C70-130，然而，由於台灣黑潮渦輪發電機處於剛起步階段，仍有相當多議題尚待探討，且其工作環境是位於水下，若結構發生損壞，不僅維修工程困難，且費用亦相當龐大，因此，基於成本與安全考量，葉片的使用年限是不可忽視的重點之一。本研究以實驗的方式，探討黑潮渦輪發電機所使用之葉片材料，進行試片老化與改變外力頻率對於疲勞壽命的探討，期望未來在台灣東岸佈放黑潮渦輪發電機組時，能提供複合材料葉片使用年限的推估。



圖 1-3 黑潮渦輪發電機葉片側視圖(左)、剖面圖(右)



1.3 研究目的

複合材料疲勞試驗的研究日益增多，然而，由於複合材料的問題過於複雜，影響疲勞性質的因素非常多，包括纖維種類、疊層順序等等，雖然眾多學者提出了許多不同的方法去預測複合材料的疲勞破壞進程，然而，卻仍未有一準確預測的理論出現，所以現階段仍須透過實驗的方式來了解複合材料的疲勞特性。此外，由於黑潮渦輪發電機組工作環境為水下，材料浸泡於海水中勢必會使得材料性質有所改變，了解複合材料受到老化後的疲勞性質改變。Sun[4]發現外力頻率對於複合材料疲勞性質亦有所影響，在 ASTM 材料試驗的規範中，建議進行疲勞試驗時的循環應力頻率應設定於 1 Hz~5 Hz 之間，但結構所實際承受的外力頻率卻未必是位於這個範圍之內，因此，了解複合材料老化前、後的疲勞性質，外力頻率對於複合材料疲勞壽命的影響，為本研究之目的。

1.4 重要性與貢獻

本文所研究探討的玻璃纖維複合材料，其疊層是根據台灣大學團隊所設計的黑潮渦輪發電機葉片結構進行鋪設，在工程上，疲勞破壞常為一位隱形殺手，近年來多起的飛機失事，均是由於金屬發生疲勞破壞的關係，因此，為了避免黑潮渦輪發電機有類似的情形出現，本文參考黑潮渦輪發電機的工作環境進行海水老化與外力頻率的探討，了解上述變因會使得材料性質如何改變。

近幾十年來，複合材料的相關研究非常巨量，雖已有多位學者分別對海水老化及外力頻率這兩類議題進行研究，然而，影響複合材料疲勞壽命的變因非常廣泛，最常見的差異就是在使用纖維種類與疊層順序的差異，這二者的差異往往會使得材料疲勞性質亦有所差異，也不易得到兩者之間交互作用後對疲勞壽命的影響，此外，在多數頻率探討的實驗中，並無將溫度進行控制，使得在探討疲勞性質的改變時，常將原因歸咎於溫度上升所造成的，而本文在進行外力頻率探討的實驗時，持續使用冷卻槍吹拂試片，使得試片在實驗進行中溫度不會有所改變，更針對性的探討出頻率與疲勞性質的關係。

最後，本文希望藉由同時進行海水老化與外力頻率的實驗，除了要了解黑潮渦輪發電機葉片材料的疲勞性質外，亦希望能夠給予投身於複合材料疲勞研究的夥伴們，後續進行相關研究時，有一個能夠依循的方向做參考。




1.5 名詞對照與符號說明

1.5.1 中文名詞與英文翻譯對照表

中文名詞	英文翻譯
纖維增強複合材料	Fiber reinforced composite
基材破裂	Matrix cracking
脫層	Delamination
疊層	Stacking sequence
含水量	Water content
孔隙率	Porosity
疲勞壽命	Fatigue life
潛變	Creep
老化	Aging
極限強度	Ultimate strength
鈦	Ruthenium
聚雙環戊二烯	Dicyclopentadiene
疲勞極限	Fatigue limit / Endurance limit
國際標準組織	International Organization for Standardization
疲勞壽命曲線	S-N curve
疲勞模數	Fatigue modulus

1.5.2 符號說明

符號	單位	中文說明
σ_{max}	MPa	最大應力
σ_{min}	MPa	最小應力
$\Delta\sigma$	MPa	應力範圍
σ_a	MPa	施加應力
σ_m	MPa	平均應力



R	-	應力比
N	次	循環次數
σ_u	MPa	極限強度
E	MPa	楊氏模數
F	MPa	疲勞模數
D	-	破壞率

第2章 文獻回顧

複合材料的概念，早在公元前 1500 年，出現在埃及的稻草強化磚塊中。在東周時期(770 BC~721 BC)，鑄劍師已經發現當青銅加入 14%的錫，可以有效提升劍身的韌性，使利劍兼具高強度及高韌性的特性，此為古代利用複合材料很好的一個實例。時至今日，複合材料在近幾十年內，更加廣泛的使用在我們的生活中，除了擁有質地輕、價格便宜、耐高溫、耐腐蝕等優點，更因為複合材料剛性強，能達到工業界使用之標準，因此被廣泛的使用於各界。

在文獻[5]中，Bergan 等人討論了纖維增強複合材料應用於海洋工業時，在設計與分析時遇到的問題，並利用實驗針對纖維增強複合材料的材料特性進行研究。文獻[6, 7]則是針對了風力發電機及潮汐發電機的複合材料葉片進行了探討，了解當複合材料葉片在不同的運作環境時，是否具有足夠的強度及安全性。文獻[8]則是提及了複合材料應用於航太產業的演進，最早期的飛機並未使用複合材料進行製作，到後續則開始大量使用複合材料進行製造，如圖 2-1，然而，最近新型的波音 787，如圖 2-2，複合材料的使用重量已達全機的 50%[9]，文獻[10]針對了飛機進行了調查，為最大化重量效益，軍用機複合材料比重從過往的 2%增加到了 24%，如圖 2-3，足以見得複合材料對於航太產業有相當的效益。

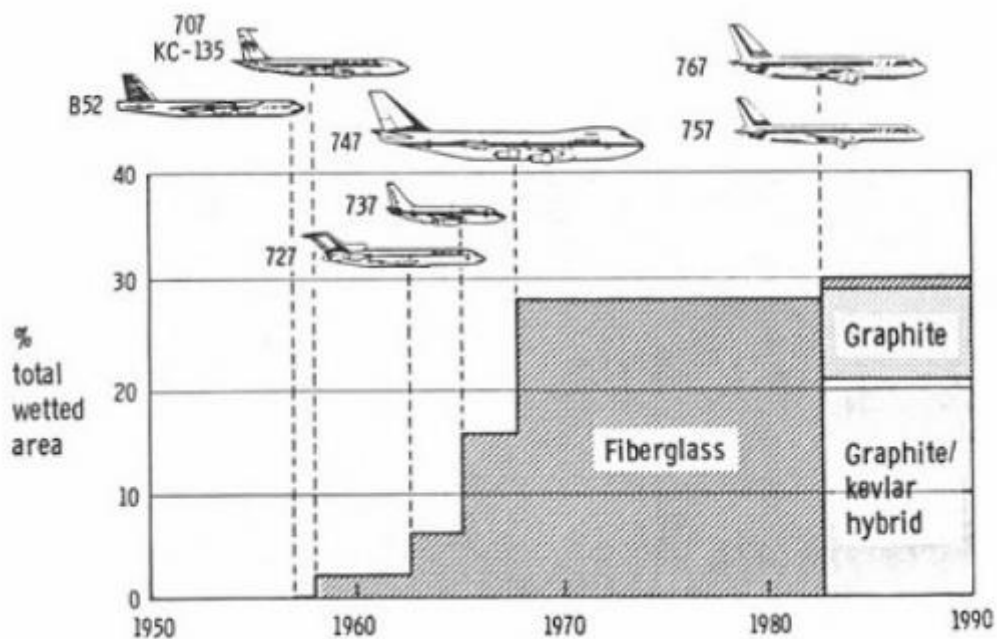


圖 2-1 波音 767 複材重量比例[8]

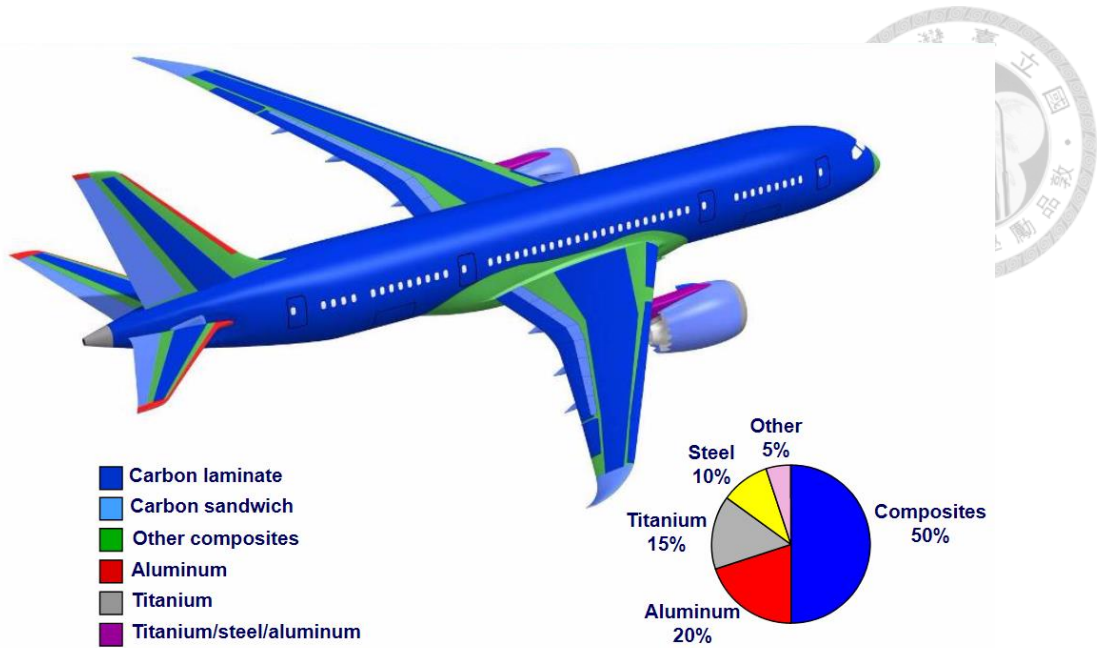


圖 2-2 波音 787 材料重量比例[9]

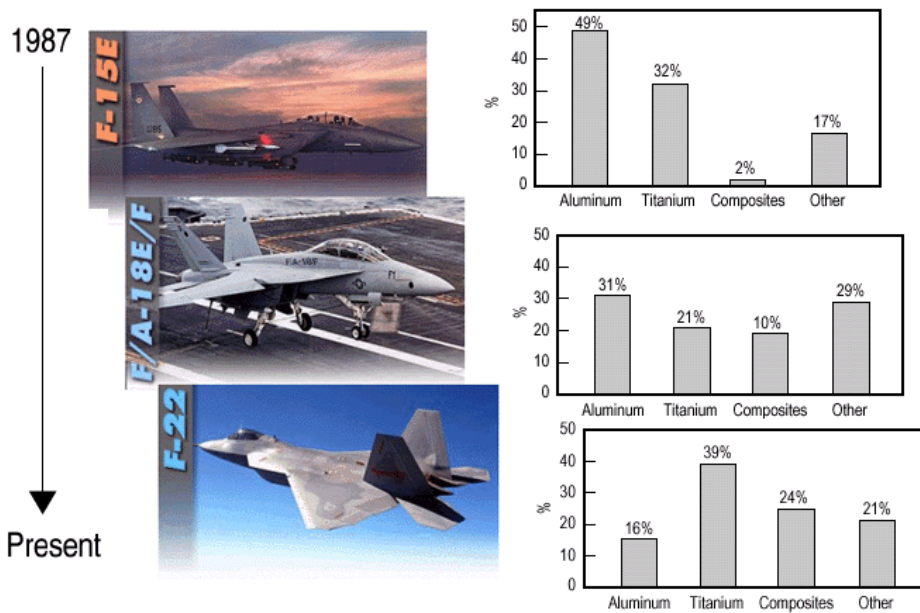


圖 2-3 軍用機材料比例[10]

在文獻[11]中，研究 PFC(particulate filler composites)與 SFC(short-fiber reinforced composite)兩種不同的複合材料假牙性質，如圖 2-4，比較兩者在設計的條件狀況下，何者會有更佳的使用性質。由上述的文獻我們可以了解到，複合材料的應用十分廣泛，在海洋工程、能源、航太及生醫，都可以見到複合材料的身影。

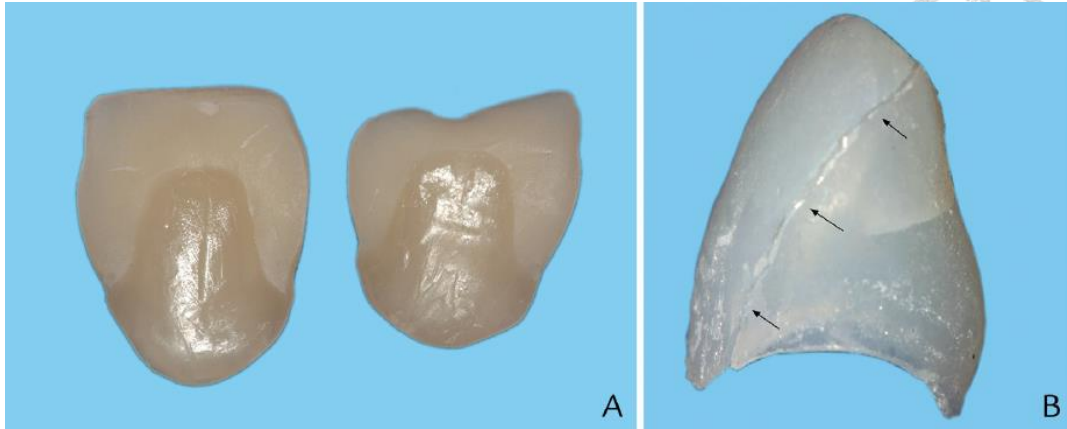


圖 2-4 複合材料假牙 A. PFC B. SFC [11]

2.1 複合材料

由於複合材料廣泛的使用在我們的生活中，因此，複合材料的破壞也成為我們無法避免的問題，然而，材料發生破壞的機制與材料種類息息相關，相較於金屬材料而言，複合材料的破壞機制較為複雜。為了解複合材料在受到外力或反覆應力的作用下，而發生缺陷、裂紋，進而導致材料發生破壞的研究繁多，其中包含：Kashtalyan[12]、Kobayashi[13]及 Todoroki[14]針對基材破裂的機制進行探討；Sevkat[15]、Berbinau[16]及 Yuan[17]針對纖維斷裂的機制進行探討；Hitchen[18]、Seif[19]及 Samborsky[20]則是針對了纖維層間的脫層破壞進行研究。

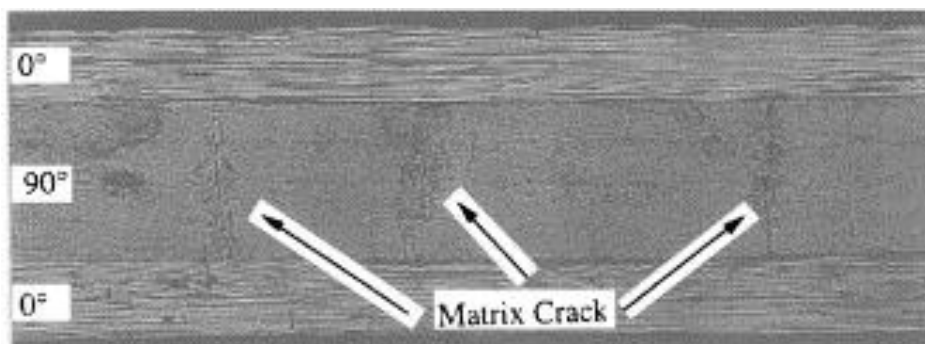


圖 2-5 基材破壞[13]

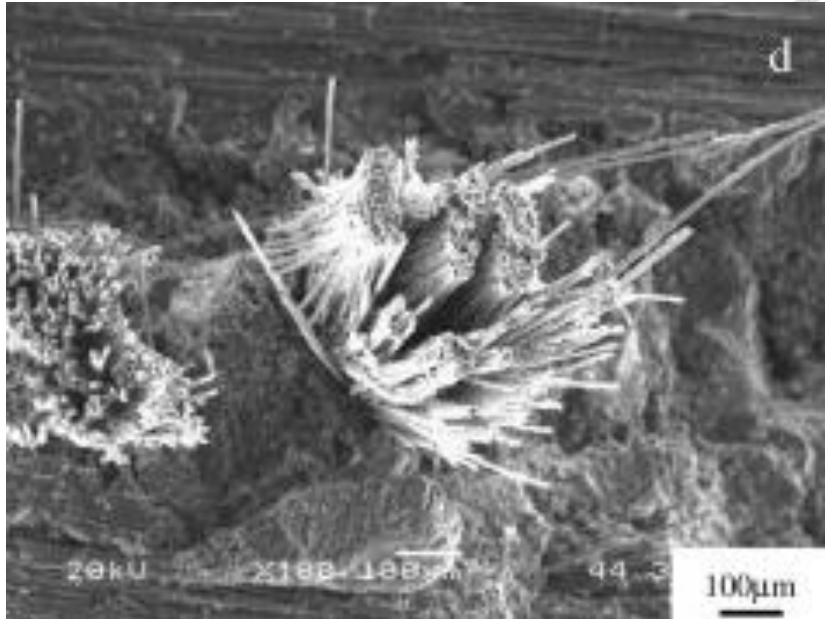


圖 2-6 纖維斷裂[17]

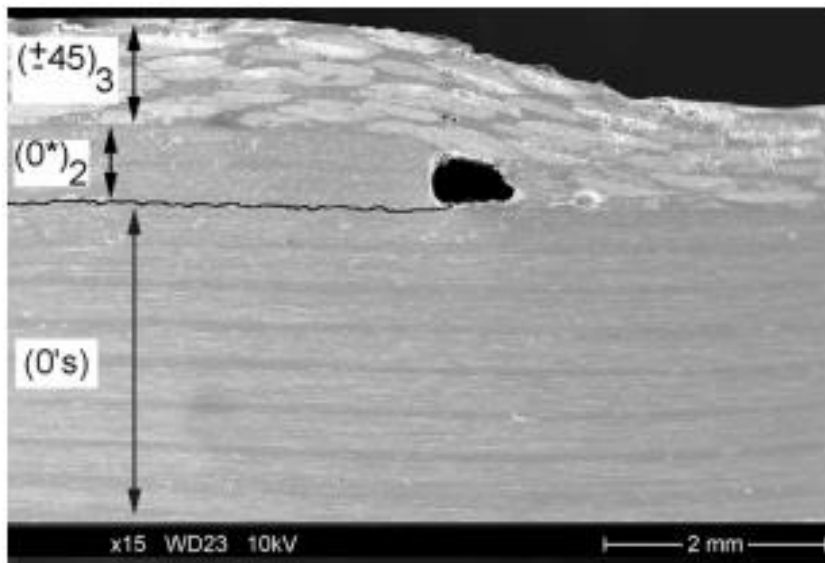


圖 2-7 纖維層間脫層破壞[20]

除了單純的破壞機制外，Tohgo[21]及 Kawai[22, 23]更進一步的纖維疊層方向對於破壞機制的影響進行了探討；Kumazawa[24]、Bechel[25]及 Will[26]則是進行了一系列不同疊層順序，對於破壞機制影響的實驗。這類多種因素耦合的結果，較一般金屬材料的破壞特性複雜多變，因此，找出能評估並預測複合材料破壞的模型，仍是現今研究的主要方向之一。

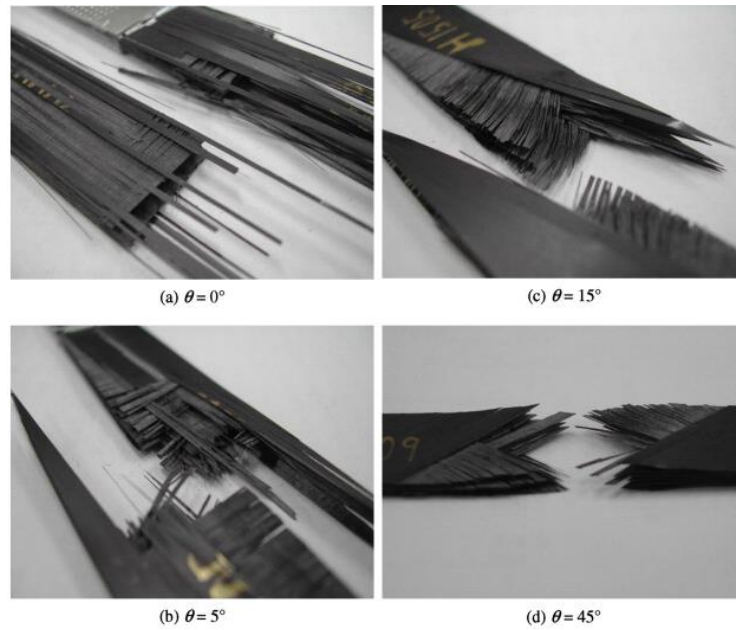


圖 2-8 不同疊層方向[22]

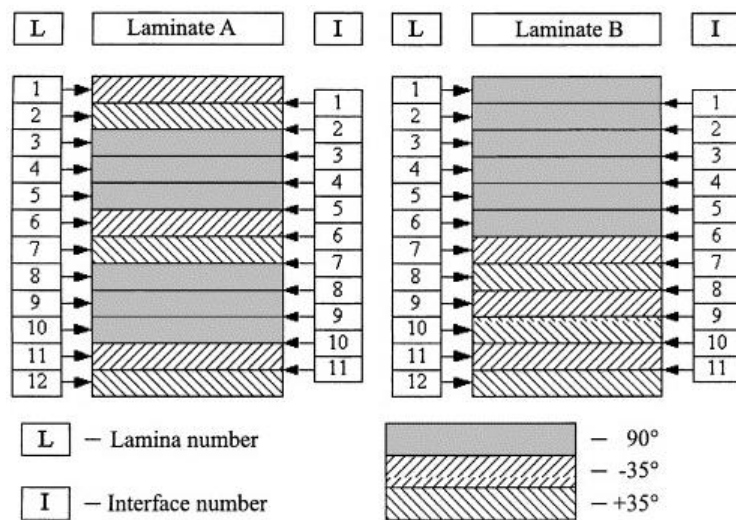


圖 2-9 不同疊層順序示意圖[26]

2.2 複合材料疲勞研究

在文獻[27]中提到，疲勞壽命對於工程元件是一個常重要的問題，它直接影響到的是工程結構的使用年限，在文獻[28]中提及了許多我國風力發電機組故障的原因，在複合材料葉片的部分，雖文中僅提及雷擊破壞及表面損傷，然表面損傷往往是由裂紋造成的疲勞損傷所引起，文中亦提及因此，了解複合材料的疲勞性質並預測其疲勞壽命，亦是一十分重要的主題。

然而，因為影響複合材料的疲勞性質過多，包含基材性質、纖維材質、介面結構、纖維方向、含水量、孔隙率等等因素，均會對複合材料的疲勞性質造成影響，

加上複合材料在疲勞破壞的過程中，應力會不斷重新分配，使得此主題複雜性相當高，但仍有許多學者為解決的此問題努力。

在早期對於疲勞性質的研究中，Konur[29]提出了當使用的纖維不同時，複合材料所擁有的疲勞特性也會不同，此外，Echtermeyer[30]也提出了一個假設，低週疲勞時，複合材料的疲勞特性主要是由基質，而在高週疲勞時，基質對於複合材料的疲勞特性影響逐漸減小，此一假設也是目前大家所廣泛接受的觀點。Shih[31]透過實驗證明了，當複合材料交界面越強時，複合材料的疲勞特性亦會隨之提升。除了影響疲勞特性因素的研究外，亦有相當多的學者著力於疲勞模型的建立，由於前面提到的因素，使得複合材料的損傷累積機制與一般常見的等向性材料十分不同，Shiri[32]的文獻中有將複合材料與一般等向性材料的損傷累積機制進行比較，如圖 2-10(a)，並詳述了複合材料破壞的三個主要階段，第一階段損傷累積會由於基材出現非交互作用的裂紋而迅速上升，第二階段損傷累積則會趨向平緩，裂紋開始交會作用並造成脫層的現象發生，最後，在第三階段時，損傷累積會再次由於纖維開始斷裂而迅速的上升，如圖 2-10(b)。Degrieck[33]在 2001 年時將過去關於複合材料的破壞機制進行了整理，並依照預測方法，將模型分為三大類型：

1. 疲勞壽命模型(Fatigue life models)：

此模型是利用透過實驗取得材料疲勞壽命曲線，並配合材料定壽期圖型來得到材料的疲勞狀況，可以預測材料所能夠承受的循環負載次數，並沒有將微觀的材料損傷累積機制納入考慮，因此所預測出來的疲勞壽命會有較大的誤差，但由於進行上較為簡單、方便，因此此類模型在工程上仍然被廣泛使用，亦不斷有改良的研究進行，如 Sarfaraz[34]即有提出混合式的模型，進行疲勞壽命的預測。

2. 殘餘剛性模型(Residual stiffness models)：

此模型主要是透過實驗了解材料楊氏模數的衰減，再利用參數化的方式去描述剛性的衰減，當材料剛性衰減至剛性強度極限時，即認定假定材料受到損壞，進而推求出材料的疲勞壽命，此方法目前亦有眾多的研究進行，如 Shiri[35]與 Peng[36]均是進行此模型的研究。

3. 逐步損傷模型(Progressive damage models)：

此模型較上述兩者多考慮了微觀的破壞行為，例如：脫層、橫向基材破壞、

裂紋生長等等，此類型的模型由於考慮了微觀的破壞機制，因此可以得到較為準確的結果，但也正因為考慮了微觀的破壞機制，因此需要的資源也相對較高，不論電腦運算資源，或是實驗數據，需求的資源量都較上述其他二種方式更高，Shokrieh[37]與 Clay[38]均就此模型進行研究。

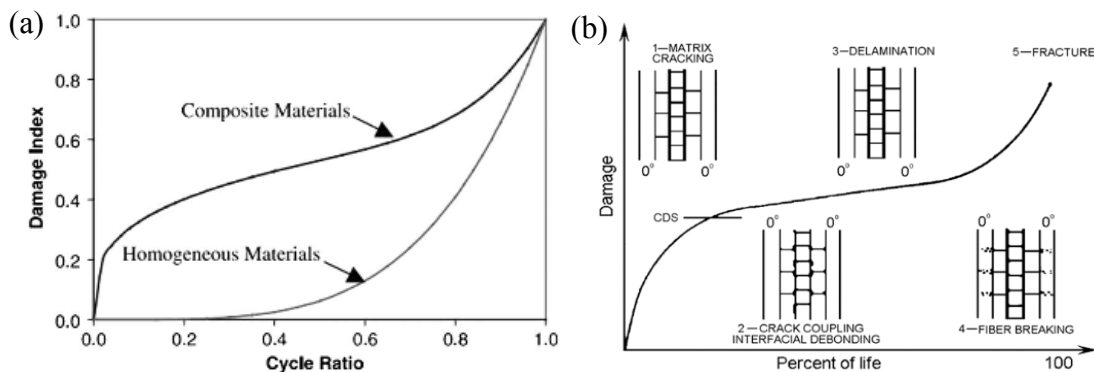


圖 2-10 (a)複合材料與等向性材料損傷累積比較 (b)複合材料三階段破壞過程 [32, 39]

2.3 材料老化研究

由於複合材料在工程上使用的比例日益增加，然而，工程上的材料不同於一般消耗品，往往會有較長的使用年限需求，以風力發電機為例，DNN-RP-C203[40]規範中，使用的設計年限為 20 年，由此可見，材料在 20 年間的穩定性及各項力學表現，亦是一不可忽視的問題。

材料老化的研究，早在 1977 年時 Struik[41]就有對塑料與玻璃進行老化的研究，時至今日，此類的研究亦不斷進行著，其中，由於能源產業大量使用複合材料做為不論風力發電、洋流發電、潮汐發電等渦輪機組之葉片，兼且前文提到複合材料與一般等向性材料差異甚大，但在各產業複合材料的使用比重又逐漸增加，因此近年有相當多學者進行複合材料老化的相關研究。

1999 年，Gellert[42]將四種不同基材製成的複合材料，浸泡於 30 度的海水中進行老化，並將部分試片施加外力使潛變發生，探討不同基材之複合材料，於老化後的彎曲強度與重量變化。2009 年，Maurin[43]將相同的複合材料，分別浸泡於 20、40、60 度的海水中 9 個月，對破壞時的極限強度進行探討。2012 年，Boisseau[44]針對潮汐發電葉片所使用的複合材料，進行海水老化後的強度測試，發現該葉片所

使用的複合材料破壞型式，隨著老化時間增加而由壓縮破壞逐漸轉為拉伸破壞，如圖 2-11。2013 年，Davies[45]對於潮汐發電葉片材料進行探討，比較使用玻璃纖維與碳纖維的複合材料，經老化後的疲勞表現差異；Boisseau[46]探討了不同種類的玻璃纖維對於複合材料疲勞壽命的影響，並比較複合材料老化前後的疲勞表現。2016 年，Rao[47]探討了經歷相同條件，不同老化時程的玻璃纖維複合材料的機械性質差異；Hu[48]進行了鈦元素催化的聚雙環戊二烯、樹脂與玻璃纖維複合材料的海水老化試驗，發現老化時程一個月的複合材料，在疲勞表現上會有所增加，但當老化時程來到三個月時，疲勞表現會有明顯的下降趨勢；Kennedy[49]針對潮汐發電葉片所使用的複合材料進行了加速老化與疲勞試驗，進行疲勞試驗時，使用防水膠帶將複合材料與海水密封，整個實驗過程試片均是在有水的環境中進行。

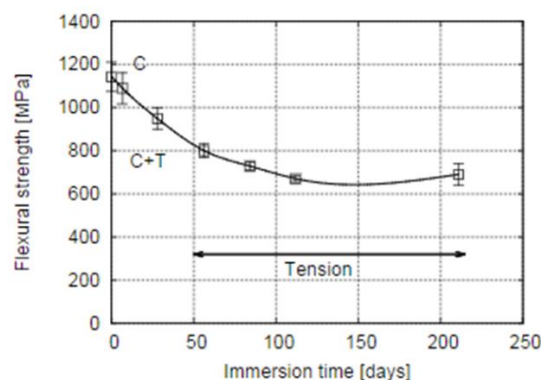


圖 2-11 浸泡時間與破壞型式關係[44]

2.4 外力頻率研究

一般而言，在探討金屬材料的疲勞性質時，我們認為與外力頻率的關係是獨立的，意即外力頻率對於金屬的疲勞壽命並無關係，1994 年，Fujczak[50]針對 ASTM A723 鋼進行不同外力施加頻率的研究發現，在外力頻率 1.5Hz 與 15Hz 時，對於材料的疲勞壽命並無明顯的影響，如圖 2-12。然而，由於前文所述，複合材料的性質與金屬材料的性質差異甚大，因此，亦有諸多學者對於外力頻率與複合材料疲勞壽命進行探討。1993 年，Shuler[51]進行了 1Hz、10Hz 與 50Hz 三種外力頻率的疲勞試驗，發現複合材料剛性衰減的程度會隨外力頻率增加而增加，且外力頻率增加時，材料疲勞極限亦會隨之下降。1994 年，Holmes[52]將外力頻率由 25Hz 逐步增加到 350Hz，發現複合材料的疲勞壽命會隨頻率增加而有

顯著的下降，且不同的外力頻率會使試體溫度上升，上升幅度隨頻率增加而增加。2003年，Stachler[53]進行了4Hz、40Hz與375Hz三種外力頻率的疲勞試驗，發現當外力頻率為4Hz與40Hz時，兩者在頻勞性能方面表現並無太大的差異，然而，當外力頻率增加到375Hz時，試體疲勞壽命則有明顯的下降趨勢，如圖2-13。2011年，Ruggles-Wrenn[54]在1200°C的高溫下，探討了0.1Hz、1Hz與10Hz的外力頻率，對於陶瓷基複合材料的影響，發現在高溫的環境下，隨著外力施加頻率的增加，材料壽命有顯著的下降。

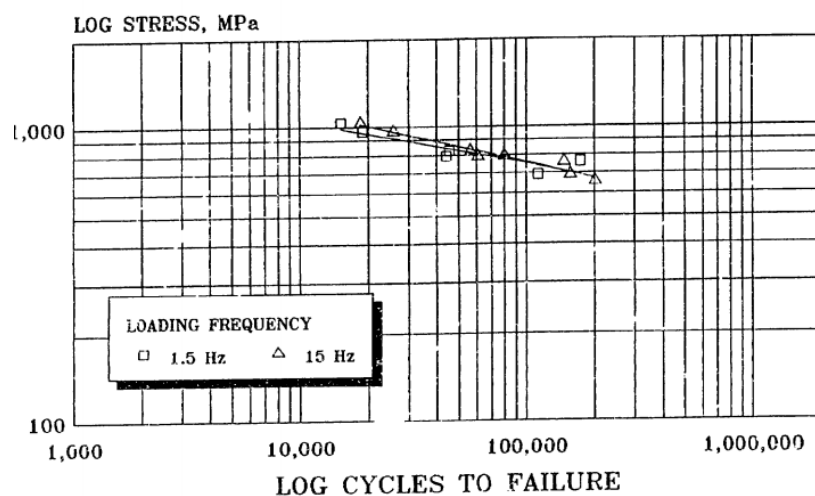


圖 2-12 ASTM A723 鋼於外力頻率 1.5Hz 與 15Hz 之疲勞壽命曲線[50]

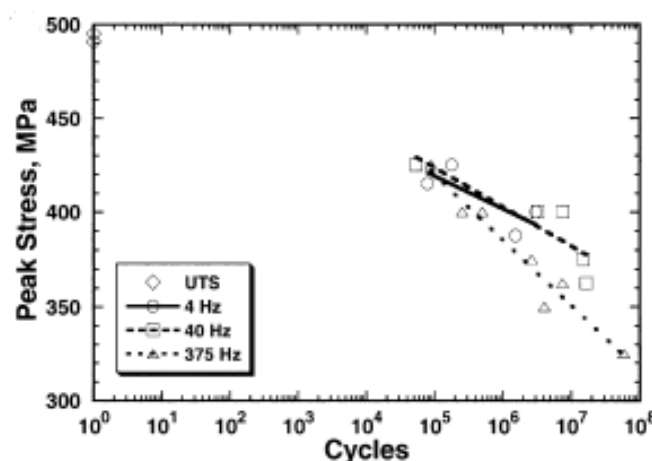


圖 2-13 碳纖維複合材料於外力頻率 4Hz、40Hz 與 375Hz 的疲勞表現[53]

第3章 研究方法



3.1 研究流程

本文的研究流程如圖 3-1 所示，首先，先根據黑潮渦輪發電機所使用的複合材料疊層，自行製作複合材料，同時，為探討工藝所造成的誤差，亦同時請先進複合材料製作複合材料，並將製作完的複合材料板，送至輝哲電機進行水刀切割，以確保試片尺寸不會有過大的誤差，再將切割完畢的試片利用水浴槽隔水加熱的方式進行海水老化。而後，將試片進行彎曲試驗，用以了解試片彎曲強度，再根據試片彎曲強度設定疲勞負載，進行後續的疲勞試驗。最後，探討頻率與溫度之關係，並以冷卻鎗進行試片降溫測試，確定冷卻鎗有足夠的降溫效果後，進行降溫後的疲勞試驗，比較降溫前後試片疲勞壽命之差異，進行結果討論。

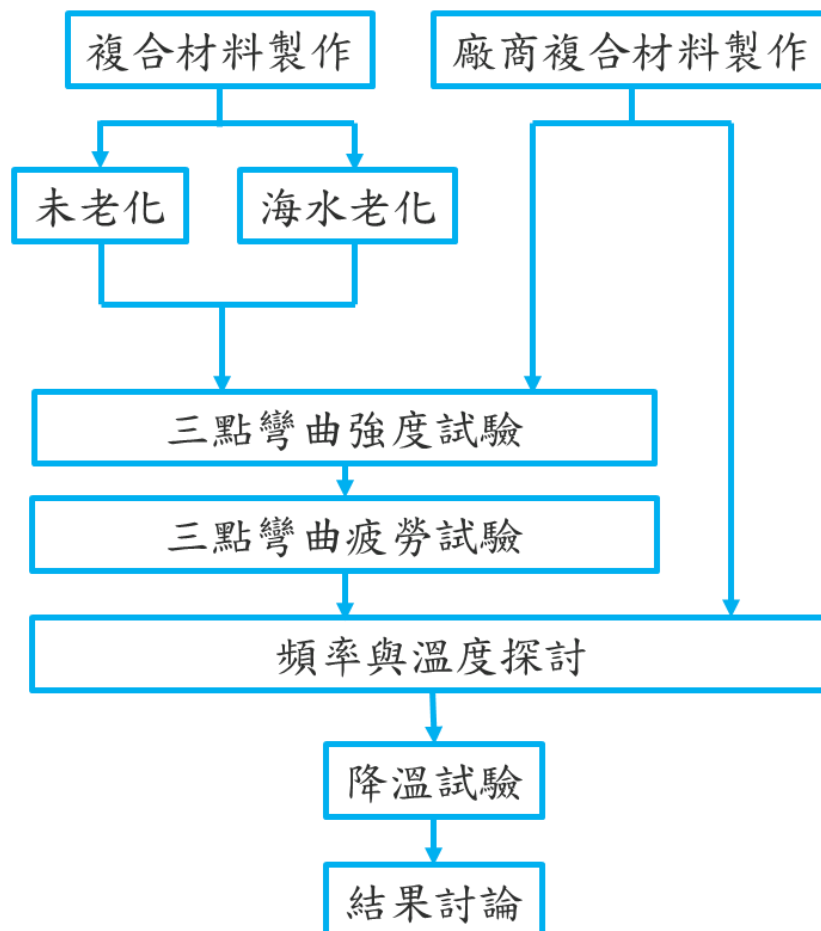


圖 3-1 研究流程圖

3.2 理論說明

疲勞(fatigue)是用來表示材料於循環負載作用下的損傷和破壞。國際標準組織

(International Organization for Standardization, 以下簡稱 ISO)在 1964 年發表的《General principles for fatigue testing of metals》一文中提及，疲勞的定義為：金屬材料在應力或應變的反覆作用下，所發生的性能變化。此定義也廣泛的使用於非金屬材料當中。引起疲勞破壞的循環應力，往往遠小於靜態試驗所取得的安全負載，因此疲勞常是結構與機械失效的主要原因之一，因此疲勞壽命的研究確有其重要性。

3.2.1 疲勞壽命曲線(S-N curve)

對於一固定應力振幅的時域性疲勞負載，一般而言，我們會以正弦波的形式表示，如圖 3-2，這樣表示方式的優點在於，可以藉由下列任兩種參數描述此負載特性，設最大應力為 σ_{max} 、最小應力為 σ_{min} ，則應力範圍 $\Delta\sigma$ (stress range)表示如式 2、應力振幅 σ_a (stress amplitude)表示如式 3、平均應力 σ_m 表示如式 4 與應力比 R 的表示如式 5：

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad \text{式 2}$$

$$\sigma_a = \Delta\sigma/2 = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 \quad \text{式 3}$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 \quad \text{式 4}$$

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \quad \text{式 5}$$

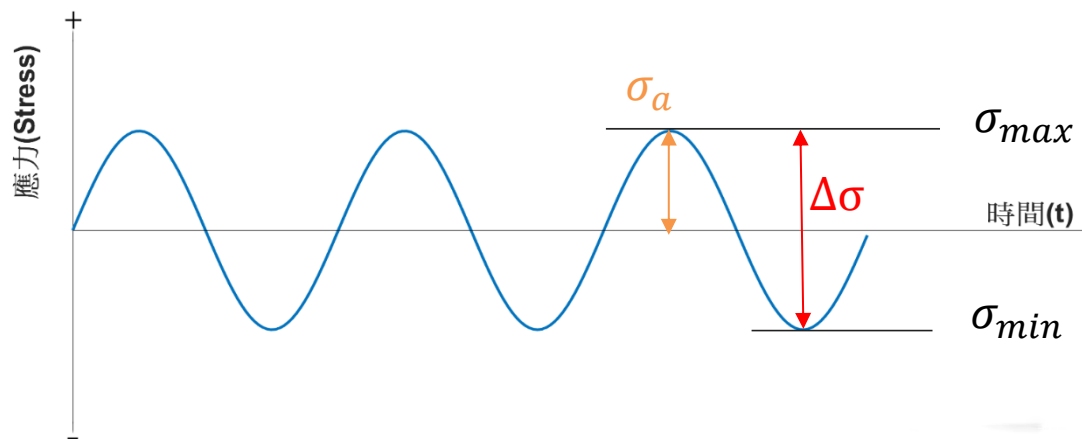
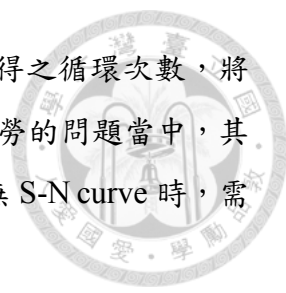


圖 3-2 應力時域性訊號示意圖

材料疲勞壽命曲線(S-N curve)為描述材料疲勞性質，曲線之建立為特定應力範圍施加於材料上，紀錄在該應力範圍 $\Delta\sigma$ 作用下，材料由完好狀態至發生疲勞破壞



所能承受之反覆次數 N ，藉由施加多組不同應力範圍 $\Delta\sigma$ 與所測得之循環次數，將實驗數據轉換成該材料之 S-N curve。S-N curve 被廣泛使用在疲勞的問題當中，其優點在於使用上十分便利，但缺點很明顯是當所需分析之材料無 S-N curve 時，需要透過大量、長時間的實驗來取得 S-N curve。

S-N curve 表示如式 6 與式 7：

$$N = \bar{a}(\Delta\sigma)^{-m} \tag{式 6}$$

取對數後亦可表示為

$$\log N = \log \bar{a} - m \log(\Delta\sigma) \tag{式 7}$$

其中， N 為理論循環次數， $\Delta\sigma$ 為應力範圍， \bar{a} 與 m 則需要透過實驗得到。

3.2.2 剛性衰減模型(Stiffness loss model)

剛性衰減模型是由疲勞模數(fatigue modulus)所延伸出來的理論，疲勞模數是由 Hwang[55]於 1984 年提出，其概念是基於材料會隨著循環荷載次數的增加而產生相對應的應變，如圖 3-3，假設材料經過 n 次的循環應力作用後，則疲勞模數則為原點位置與第 n 次所施加應力 σ_a 連線線段的斜率，因此，可以將疲勞模數表示如式 8：

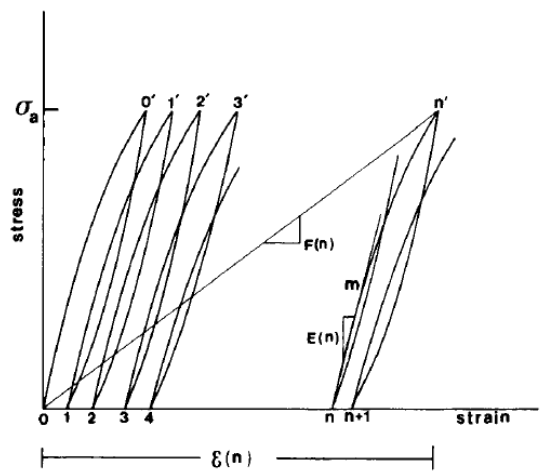


圖 3-3 疲勞模數示意圖

$$F(n, r) = \frac{\sigma_a}{\epsilon(n)} = \sigma_u \frac{r}{\epsilon(n)} \tag{式 8}$$

其中， $F(n,r)$ 為第 n 循環應力的疲勞模數， $\epsilon(n)$ 為第 n 次循環應力所產生的應變， σ_a 為循環應力， r 為應力比，即施加應力大小與極限應力的比值， σ_u 為極限應



力。

由式 8 可以寫出疲勞模數的初始及最終狀態，如式 9 與式 10：

$$F(0, r) = F_0 \approx E_0 \quad \text{式 9}$$

$$F(N, r) = F_f \quad \text{式 10}$$

疲勞模數在初始狀態為 F_0 ，假設與楊氏模數 E_0 (elastic modulus)相同，疲勞模數在循環到破壞次數 N 時為 F_f ，其中，相同材料的 F_0 應相同，並與施加的應力無關， F_f 則應隨著施加應力而改變。

若假設施加應力與任意應力作用的循環次數下所產生的應變成線性關係，則可將應力應變關係寫為式 11：

$$\sigma_a = F(n_i)\varepsilon(n_i) \quad \text{式 11}$$

其中， $F(n_i)$ 為在第 n_i 個循環應力時的疲勞模數，在上述的假設下，疲勞模數與施加的應力大小並無關，只與應力循環次數有關，因此可將疲勞模數改寫為式 12：

$$F = F(n) \quad \text{式 12}$$

再假設疲勞模數的衰減速率 $\frac{dF}{dN}$ 為與循環應力次數相關的冪函數，如式 13：

$$\frac{dF}{dn} = -Acn^{c-1} \quad \text{式 13}$$

其中 A 、 C 為材料常數，須透過實驗取得。將式 13 由 n_1 積分至 n_2 ，如

$$F(n_2) - F(n_1) = -A(n_2^c - n_1^c) \quad \text{式 14}$$

將初始狀態 $n_1=0$ 與破壞時 $n_2=N$ 帶入式 14，可得式 15：

$$F_f - F_0 = -AN^c \quad \text{式 15}$$

將式 15 進行整理可得式 16：

$$N = [B(1 - F_f/F_0)]^{\frac{1}{c}} \quad \text{式 16}$$

其中

$$B = F_0/A$$

當循環應力作用所產生的應變，與材料極限應變相等時，材料將達到破壞，因此，可以寫出式 17 與式 18：

$$\sigma_u = E_0\varepsilon_u = F_0\varepsilon_u \quad \text{式 17}$$

$$\sigma_a = F_{f,a}\varepsilon_{f,a} \quad \text{式 18}$$

其中， σ_u 為極限應力， ε_u 為極限應變， σ_a 為施加的應力， $F_{f,a}$ 為在施加應力 σ_a 下達到破壞時的疲勞模數， $\varepsilon_{f,a}$ 為在施加應力 σ_a 下達到破壞時的應變。根據應變破壞準則($\varepsilon_u = \varepsilon_{f,a}$)，我們可以寫出式 19：

$$\frac{F_{f,a}}{F_0} = \frac{\sigma_a}{\sigma_u} = r \quad \text{式 19}$$

因此，可以再將式 16 改寫為式 20：

$$N = [B(1 - r)]^{\frac{1}{c}} \quad \text{式 20}$$

式 20 中，在透過實驗取得材料常數 B 及 c 後，即可對該材料進行疲勞壽命估算。

3.2.3 疲勞累積損傷理論(Fatigue cumulative damage)

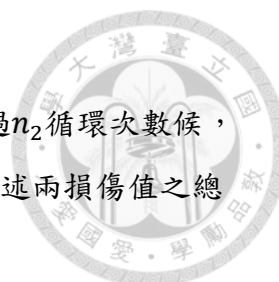
累積損傷理論是在疲勞壽命的研究中最重要的理論之一。對於結構受到等振幅循環負載時，我們可以求出結構較危險部分的應力，並由疲勞壽命曲線來估算在不同應力情形下，結構達到破壞所需要的循環次數。但若結構承受的應力不是等振幅負載，就無法直接透過疲勞壽命曲線得到預期使用年限。由於黑潮渦輪發電機是受到洋流負載的作用，實際上所承受的負載勢必將為不等振幅負載，要進一步估算預期使用年限，除了使用疲勞壽命曲線外，亦必須要借助疲勞累積損傷理論進行。

目前，在結構疲勞壽命研究中，最廣泛被使用的累積損傷理論為 Miner 線性累積損傷理論，Miner 線性累積損傷理論是假設在疲勞試驗中，試片在等振幅負載的作用下，結構損傷程度與應力循環次數將成線性累積的關係，當損傷累積到一臨界值時，結構即產生破壞。

Miner 線性累積損傷理論：

假設作用於試片的循環應力振幅值為 σ_1 ，循環次數為 n_1 ，在該應力振幅下，試片達到破壞的總受命為 N_1 。假設當循環應力振幅值 σ_1 經過 n_1 次的循環之後所累積的損傷，為達到破壞所造成的損傷的 n_1/N_1 。假設 D 為循環後的總累積損傷值，則在應力振幅值 σ_1 下，每經過一次循環後結構的損傷為 $1/N_1$ ；經過 n_1 次循環後所造成的損傷值如式 21：

$$D_1 = \frac{n_1}{N_1} \quad \text{式 21}$$



若材料繼續受到應力振幅值為 σ_2 的作用，則同理在經過 n_2 循環次數候，造成的損傷值為 n_2/N_2 。此時材料總累積損傷值 D，等於上述兩損傷值之總和，如式 22：

$$D = D_1 + D_2 = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \quad \text{式 22}$$

當總累積損傷值 $D=1$ 時，則表示材料發生疲勞破壞。

由以上關係可知，當結構受到多種應力振幅循環作用下，總累積損傷值可寫為式 23 或式 24：

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots \quad \text{式 23}$$

或

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad \text{式 24}$$

此即為 Miner 線性疲勞累積損傷理論的方程式。

3.2 實驗說明

3.3.1 複合材料說明

本文主題在於外力頻率與海水老化，對於玻璃纖維複合材料疲勞特性的影響，表 3-1 為單一玻璃纖維複合材料版所需之實驗材料表，表中，矽臘是為了使強化玻璃表面具有高度光滑性，在玻璃纖維複合材料製作完畢以後，能夠方便離膜使用；樹脂及樹脂固化劑為真空灌注法專用樹脂，為玻璃纖維複合材料基材；離模布是為了讓樹脂不會直接黏附於真空袋上，避免離模時造成試片損傷；VAP 布是為了防止抽氣過程中，樹脂通過吸出管進入抽氣機中，造成機器損壞。此外，為了統一確保試片品質，試片製作地點，全都位於台灣大學工程科學及海洋工程學系結構實驗室內進行，製作時間為 2017 年 4 月份。模具採用無色透明強化玻璃，一方面可重複使用，另一分面則是因為透明玻璃模具，可方便觀察模具內側的纖維、真空袋、樹脂灌注等步驟是否有問題，提供即早補救或捨棄製作的方便性，而試片製作尺寸長寬皆為 40 公分，玻璃纖維 DBLT-1800/M-225 及 L-900 也裁切成相同尺寸，其

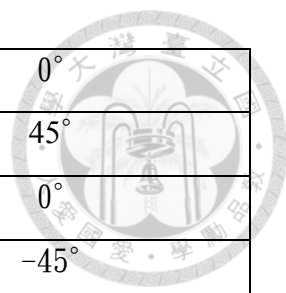
中，DBLT-1800 是由四層玻璃纖維織成，配向角依序為 45° 、 0° 、 -45° 、 90° ，1800 代表每平方公尺重 1800 克，L900 是由單層玻璃纖維織成，配向角為 0° ，疊層詳細資料如表 3-2。所有玻璃纖維複合材料製作過程使用之器具、樹脂用量，及不可重複使用的導流網尺寸、真空袋面積大小、抽真空管長度等等，均有一致的尺寸大小，其中，試片製作過程，除玻璃纖維積層外，還會鋪上離模布及樹脂導流網，面積尺寸均有定量。SCRIMP 製程(真空輔助樹脂轉注成型法)最後步驟為封上真空袋，因為玻璃纖維複合材料鋪設為三維構件，因此真空袋面積須大於試片，尺寸固定為長寬均 80 公分。試片製作中，實驗耗材均向先進複合材料公司購置。

表 3-1 實驗材料表

材料	尺寸/型號	用量
玻璃纖維	DBLT-1800/M-225	40 cm*40cm/片 共 5 片
玻璃纖維	L-900	40cm*40cm/片 共 4 片
導流網	40 cm*30 cm	1 片
真空袋	80 cm*80 cm	1 片
離模布	45 cm*45 cm	1 片
VAP 布	7 cm*5 cm	1 片
矽臘	黑珍珠	約 3 g
酒精	唐鑫 75%潔用酒精	約 5 ml
環氧樹脂	SWANCOR 2511-1A	約 1126.2g
環氧樹脂固化劑	SWANCOR 2511-1BF	約 337.8 g
強化玻璃	60 cm*60 cm	1 片

表 3-2 複合材料疊層資料

纖維層序	纖維種類	配向角
1	DBLT-1800	45°
2	DBLT-1800	0°
3	DBLT-1800	-45°
4	DBLT-1800	90°



5	L-900	0°
6	DBLT-1800	45°
7	DBLT-1800	0°
8	DBLT-1800	-45°
9	DBLT-1800	90°
10	L-900	0°
11	DBLT-1800	45°
12	DBLT-1800	0°
13	DBLT-1800	-45°
14	DBLT-1800	90°
15	L-900	0°
16	DBLT-1800	45°
17	DBLT-1800	0°
18	DBLT-1800	-45°
19	DBLT-1800	90°
20	L-900	0°
21	DBLT-1800	45°
22	DBLT-1800	0°
23	DBLT-1800	-45°
24	DBLT-1800	90°

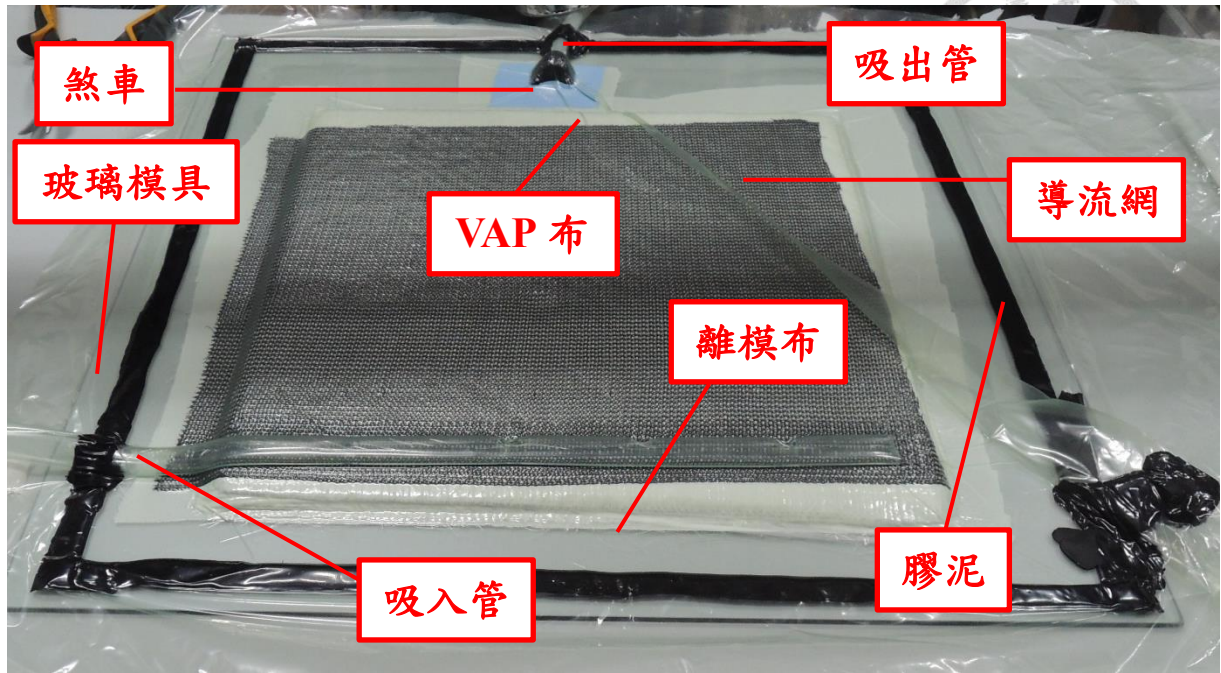


圖 3-4 SCRIMP 製程配置圖

3.3.2 玻璃纖維複合材料板製作流程

玻璃纖維複合材料板製作過程主要分為前置處理、抽真空與漏氣補強、樹脂灌注及加熱固化四個階段，詳細實驗步驟說明如下：

1. 前置處理：

首先，利用刮刀將強化玻璃模具表面殘餘的樹脂、異物清除，並使用酒精將強化玻璃表面擦拭清理，擦拭完畢後放置約 1~2 分鐘，等待強化玻璃表面的酒精揮發，酒精完全揮發後，在強化玻璃周圍預先黏貼將用來固定真空袋的膠泥，如圖 3-5，並將矽臘反覆塗抹在強化玻璃表面兩次，以確保模具表面能夠相當光滑，在進行最後脫模動作時，試片能夠完整拖離模具，不至於破損或使表面凹凸不平。再將玻璃纖維按照黑潮渦輪機葉片設計疊層排列，如圖 3-6，玻璃纖維鋪設完畢後，在其上覆蓋一塊大小相近的離模布，用以隔絕灌注的樹脂，避免直接黏附於真空袋上，使脫模時造成樹脂基材破損或表面凹凸不平，如圖 3-7，離模布鋪設完畢後，需開始建構煞車系統與吸出管，將 VAP 布下放置一大小相近之離模布，再將吸出管置於 VAP 布上方，須特別注意的是，吸出管須利用導流網進行纏繞，避免因抽真空時真空袋受到吸出管口的尖刺刺破，造成漏氣的問題，此外，煞車系統的目的是在於讓樹脂有足夠的時間浸

透玻璃纖維，不會因導流網加速致使樹脂灌注不完全，造成複合材料品質不佳，如圖 3-8，完畢後，將導流網置於纖維區域的離模布上方，讓樹脂灌注時能夠延著導流網的孔隙加速灌注，但須注意應與熱車系統保持一距離，避免樹脂未浸透纖維及到達吸出管，如圖 3-9，最後，將吸入管置於灌注入口上方，並用最開始配置的膠泥將真空袋黏貼於強化玻璃板上，即完成前置處理，最終完成圖如圖 3-10。

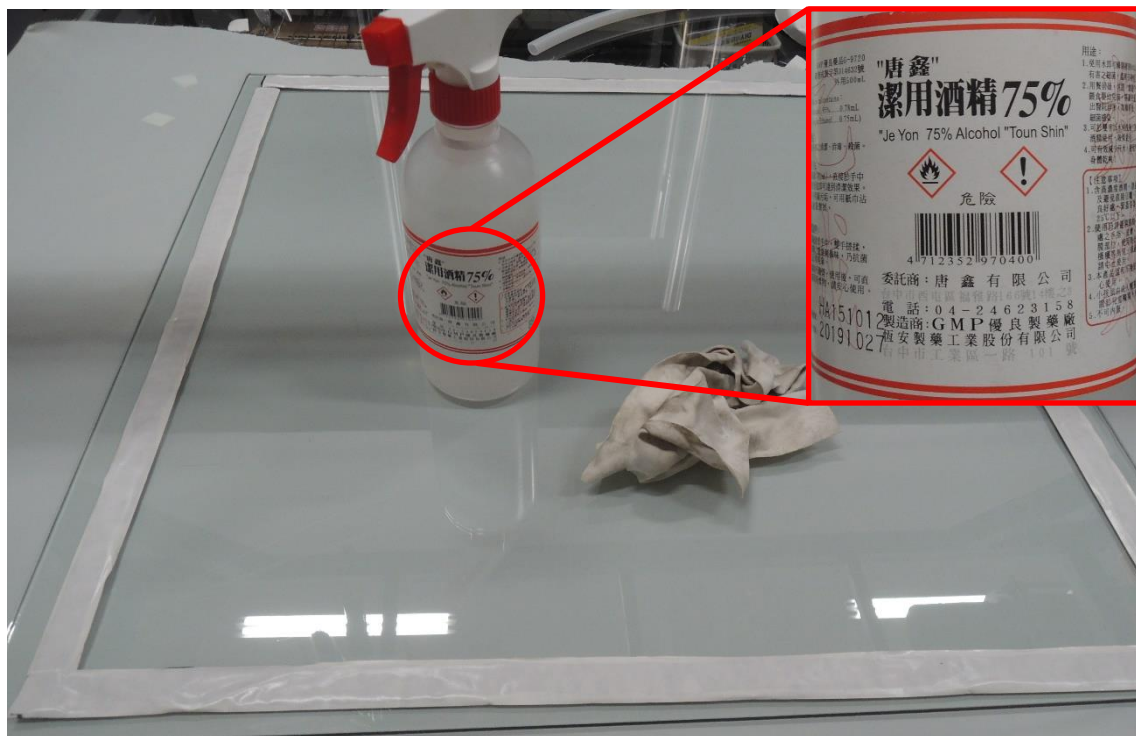


圖 3-5 清潔強化玻璃表面並於周圍黏貼膠泥

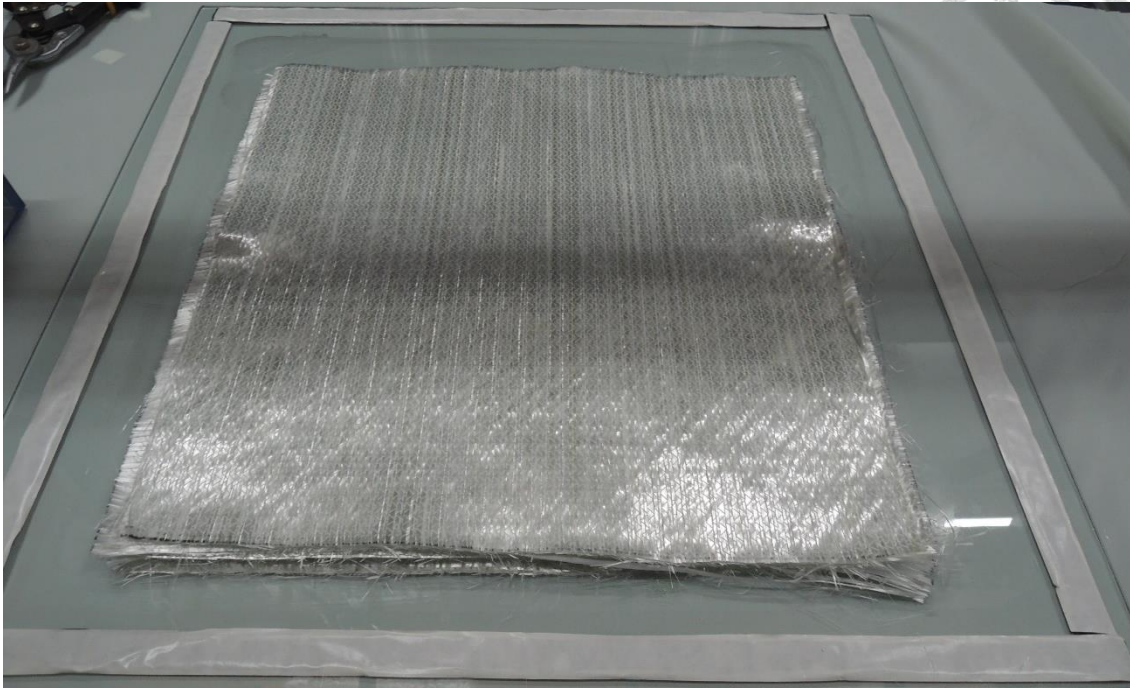


圖 3-6 玻璃纖維排列於強化玻璃

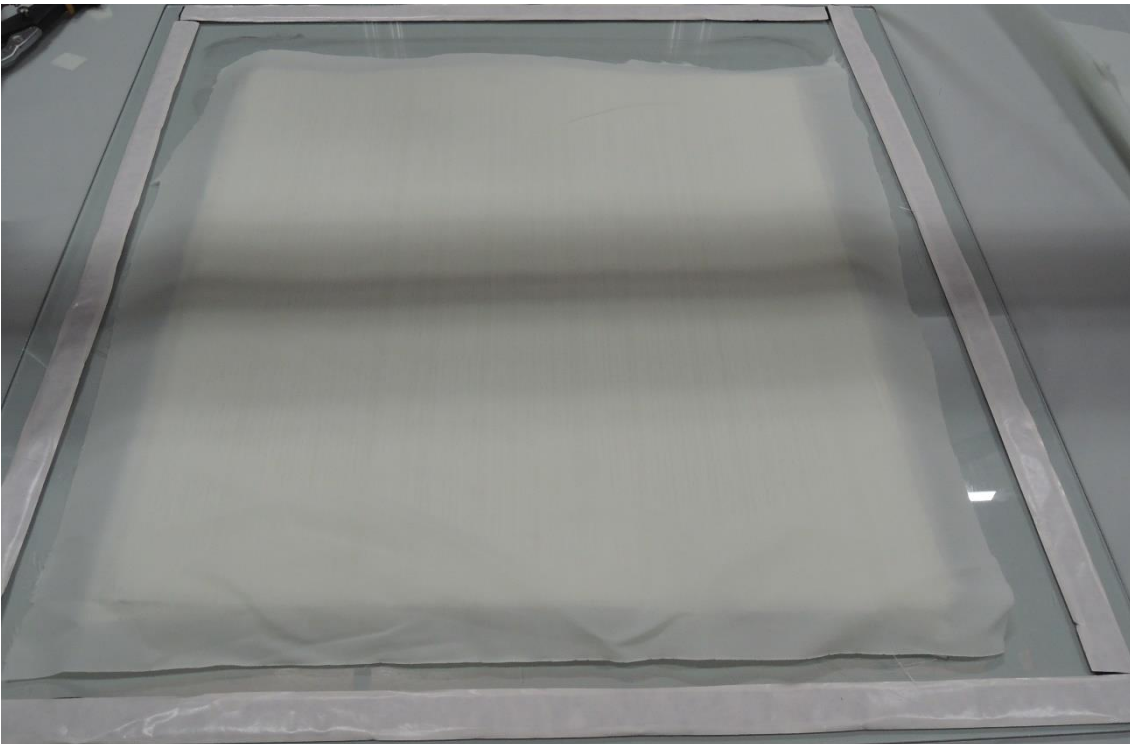


圖 3-7 離模布鋪設於玻璃纖維上方

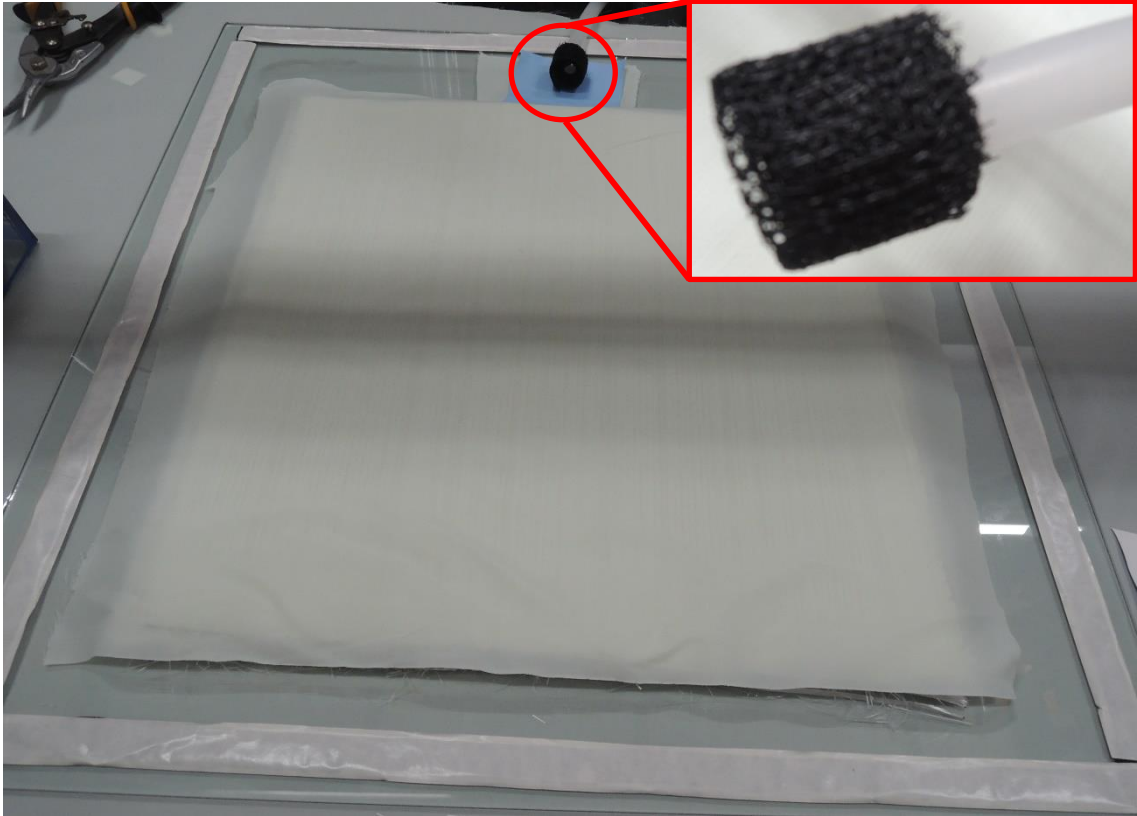


圖 3-8 熱車系統與吸出管配置



圖 3-9 導流網配置

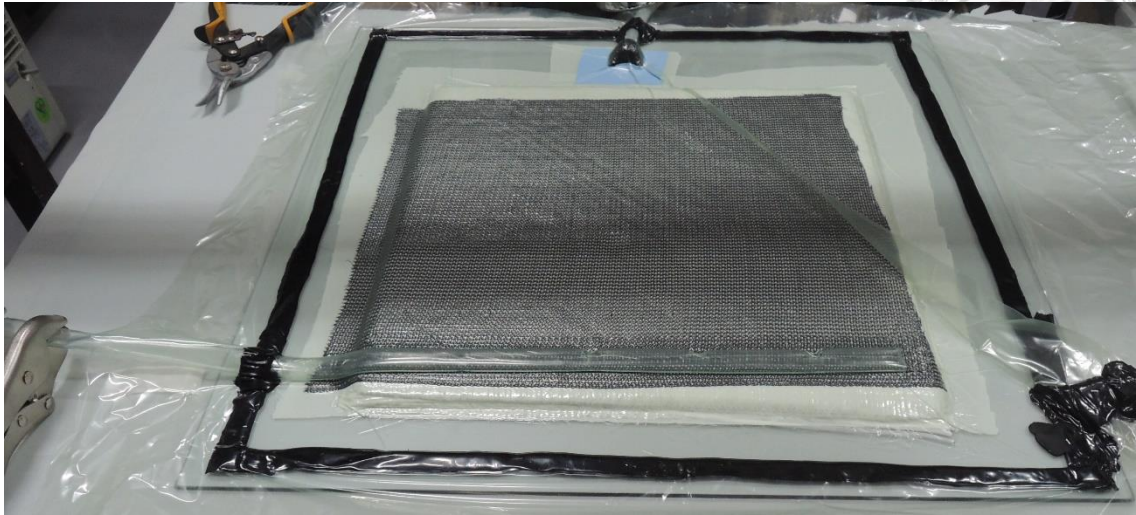


圖 3-10 前置處理完成圖

2. 抽真空與漏氣補強：

前置處理準備完成後，須進行的下一步為抽真空與漏氣補強的動作，首先，先利用夾具將吸入管夾緊，並開啟真空磊進行抽氣，本研究所使用的真空磊為 Alcatel Pascal 2010 SD，如圖 3-11 所示，待真空磊抽氣完畢後，需暫時關閉真空磊，靜置一段時間，檢查真空磊表針是否有漏氣，若有漏氣，則需利用膠泥將漏氣處進行補強，再重新開啟真空磊抽氣，反覆此動作，直至真空磊表針穩定維持在一大氣壓處，不再漏氣為止。



圖 3-11 真空磊與型號

3. 樹脂灌注：

確定模具能夠維持真空不再漏氣後，開始進行樹脂基材調配，由於環氧樹脂本身無法固化，因此需加入入固化劑幫助其固化，本研究使用的樹脂為 SWANCOR 2511-1A、固化劑為 SWANCOR 2511-1BF，詳細資料如圖 3-12 及，圖 3-13，環氧樹脂與固化劑調配比例為 10：3，本研究所鋪設纖維一平方米重量為 13725 克，而本研究製作的複合材料板面積為 0.16 平方米，按照預期纖維含有率 60%的條件下去計算，得到製作單一片複合材料板時，需要的環氧樹脂重量為 1126.2 克；需要的固化劑重量為 337.8 克，按照此計算結果進行樹脂基材調配，再利用攪拌棒將環氧樹脂與固化劑攪拌均勻，攪拌時切記力道不可過猛，使混合時在樹脂基材溶液中產生氣泡，否則將會影響製作出來的複材品質，樹脂基材調配完畢後，如圖 3-14，開始進行樹脂基材灌注，首先，將吸入管置於樹脂基材內，並開啟真空磊進行抽氣，再將吸入管上的夾具鬆脫，讓樹脂基材開始灌注，如圖 3-15。

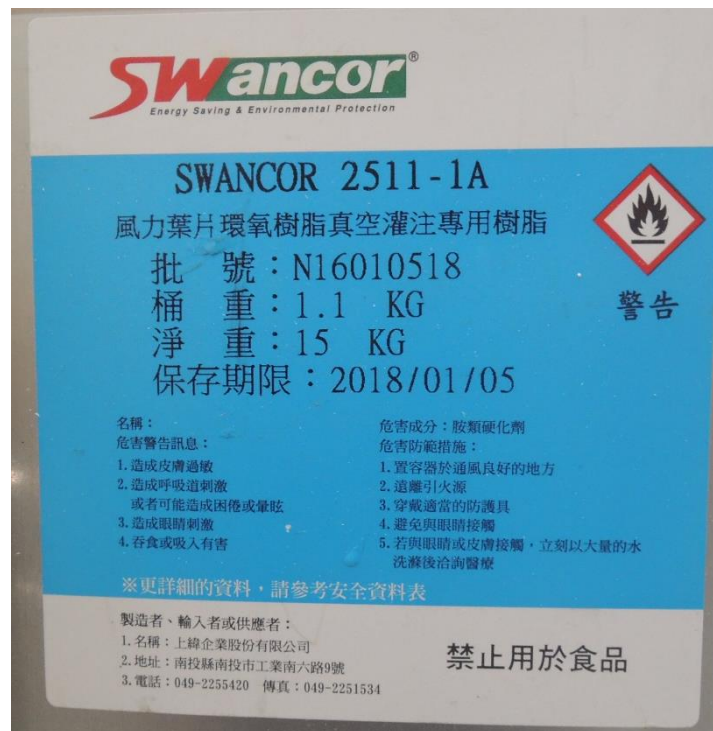


圖 3-12 環氧樹脂規格

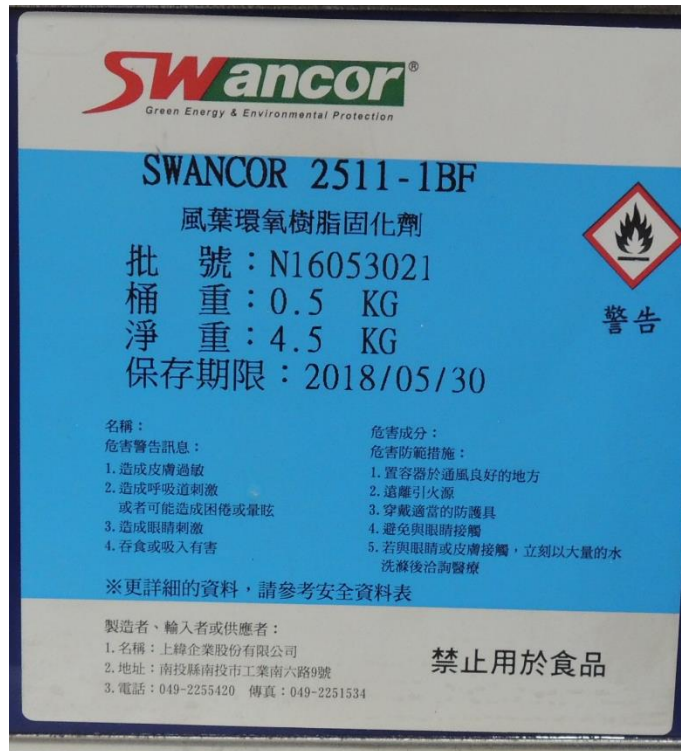


圖 3-13 環氧樹脂固化劑規格



圖 3-14 調配完成之樹脂基材

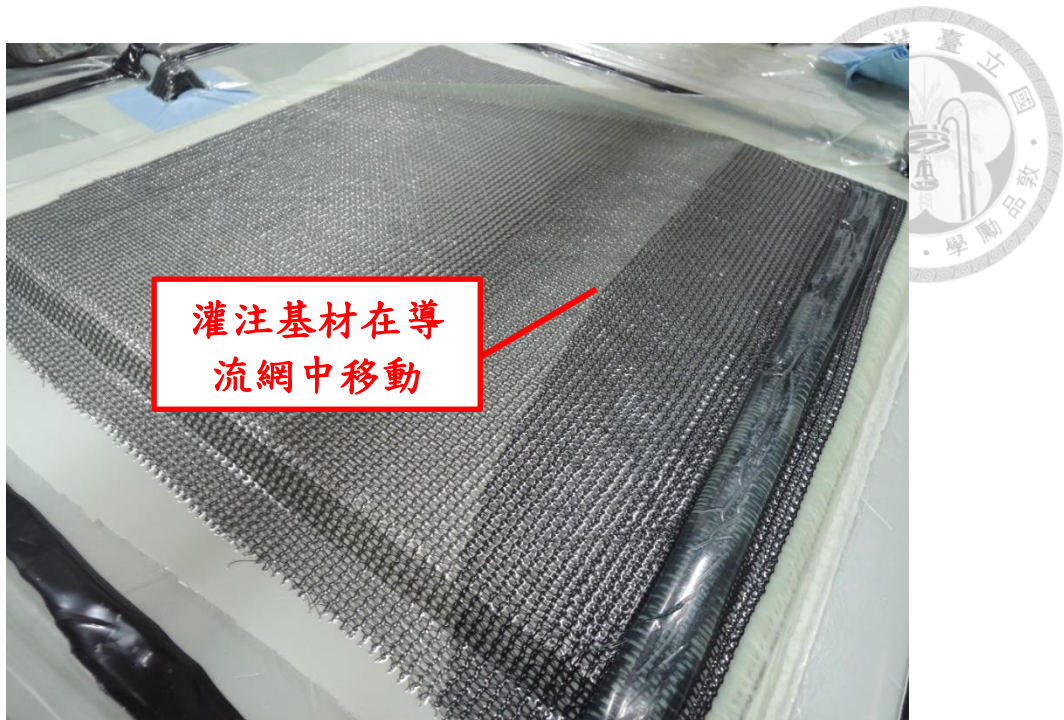


圖 3-15 樹脂基材灌注過程

4. 加熱固化：

加熱固化為試片製作的最後一個步驟，待樹脂基材灌注完畢後，將灌注好樹脂基材的模具，使用夾具將吸入管及吸出管夾緊，送入已預熱至 50°C 的烘箱烘烤 8 小時，烘箱如圖 3-16，使樹脂加熱固化，8 小時後，樹脂固化完成，利用刮刀將試片由玻璃模具取下，即完成試片，如圖 3-17。



圖 3-16 烘箱與型號

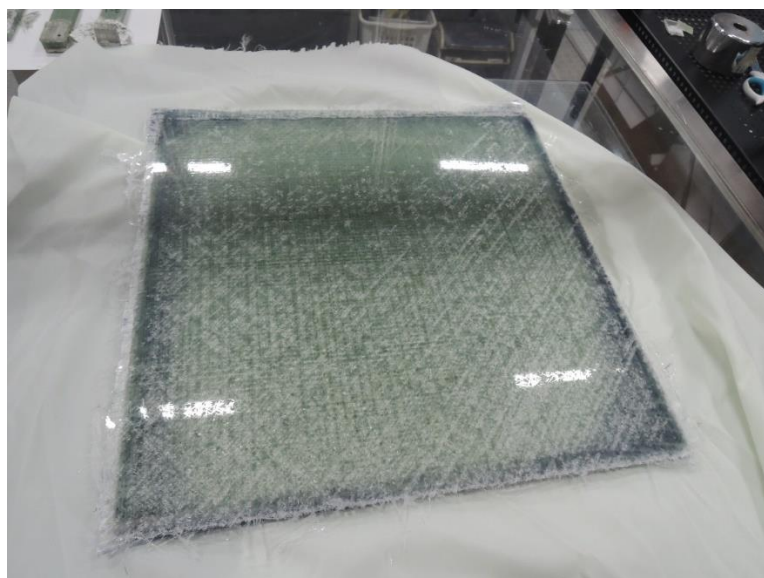


圖 3-17 試片完成圖

3.3.3 加速老化

本研究為探討黑潮渦輪發電機的葉片玻璃纖維複合材料，在海水中長時間運行所造成的材料性質改變，因此需將試片進行加速老化，本研究所使用的加速老化計算是參考 Purnell[56]提出的加速老化公式，如式 25：

$$F_{H,L} = e^{\left[\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_L}\right)\right]} \quad \text{式 25}$$

其中， $F_{H,L}$ 為加速倍率， E 為老化材料活化能， R 為氣體動力係數， T_H 為加速老化之溫度， T_L 為試片工作溫度。其中，玻璃纖維與樹脂之活化能為-93KJ[49]，並假設黑潮渦輪機將在 15°C的環境下工作，將上述條件代入式 25 中計算，可得當使用加速老化溫度 65.9°C，浸泡試片 512 小時，相當於將材料老化 20 年。

因此，本研究使用 JAANYUH CB-20 水浴槽進行老化試驗，將第一組(除 1-2 外)及第三組試片(除 3-13 外)進行老化，利用玻璃盒盛裝自行以海鹽調配 3.5 psu 的鹽水以模擬海水，再將玻璃盒置入水浴槽內隔水加熱，如圖 3-18，另外，由於水浴槽中水在加熱期間會蒸發，因此每隔 24 小時均會補充水浴槽中的水，也會同時進行水溫的溫度量測，以確保水浴槽在長時間的運作下溫度仍保持固定，並且每 7 日會重新調配 3.5 psu 的鹽水，將玻璃盒中的鹽水更換，以避免玻璃盒中水分蒸發，使得老化的鹽度有所改變。



圖 3-18 老化試驗配置

3.3.4 玻璃纖維複合材料試片尺寸與參考實驗規範

本研究進行的三點彎曲強度及疲勞試驗，遵照 ASTM D790、ASTM D7264 及 ASTM D7774 進行，試片尺寸亦遵照規範中規定，規範中提及，所有試片的跨距與厚度比，至少需為 16:1，試片寬度不可大於跨距的四分之一，考量到此疊層製作出的複材板厚度為 10~11 mm，因此，本研究使用跨距為 200 mm 的三點彎曲夾具，如圖 3-19，並且，為減少自行切割所造成的實驗誤差，複材板皆由輝哲電機進行水刀切割，將複材板切割為長 250 mm、寬 25 mm 的試片尺寸，進行後續彎曲強度及疲勞試驗，示意圖如圖 3-20。



圖 3-19 三點彎曲夾具圖

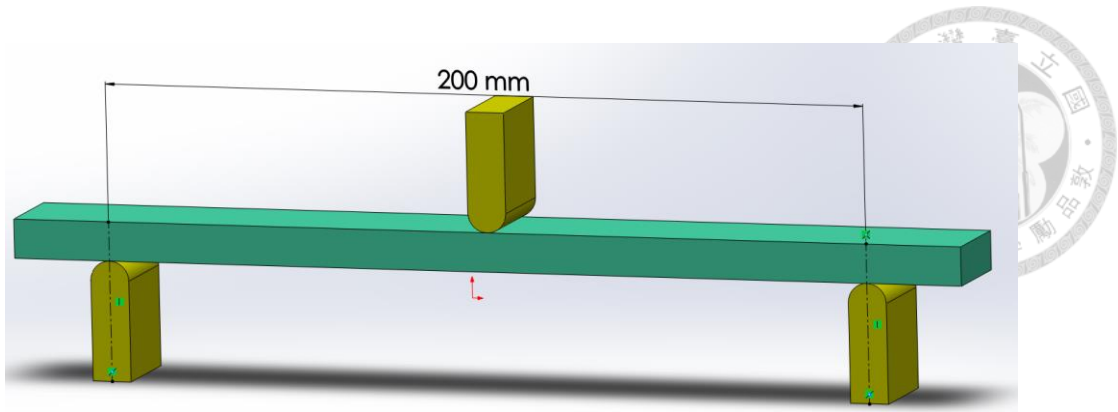


圖 3-20 三點彎曲試驗示意圖

然而，雖然試片是由廠商經水刀切割，但試片切割上仍會有所誤差，因此，進行實驗前，仍需重新量測試片尺寸，量測方法是取試片進行三點彎曲時，與夾具所接觸的三點，分別量測三點的寬度 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 及厚度 $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ ，再將量測到寬度及厚度的三點數值取平均，作為試片的寬度及厚度，示意圖如圖 3-21。試片尺寸如表 3-3、表 3-4、表 3-5、表 3-6 與表 3-7。

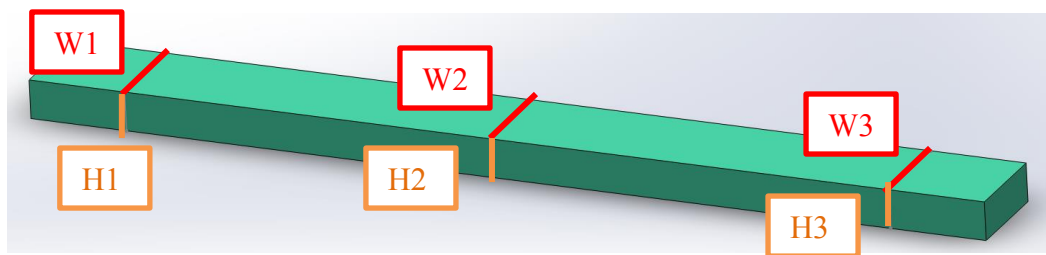
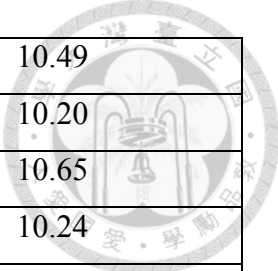


圖 3-21 寬度厚度量測示意圖

此外，進行試片彎曲試驗時，ASTMD790 及 ASTMD7264 中，亦有規定給予試片變位的速率，至少需為每分鐘 1 公釐(即 1 mm/min)，用以避免過大的應變率，使得試片受慣性效應的影響無法忽略，因此，本研究進行彎曲試驗時，在試片破壞前所給予的變位速率，均維持每分鐘 1 公釐的速率。

表 3-3 第一組試片尺寸

試片編號	試片寬度(cm)	試片厚度(cm)
1-2	24.79	9.99
1-3	24.81	10.19



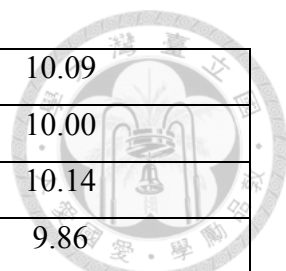
1-4	24.80	10.49
1-5	24.71	10.20
1-6	24.73	10.65
1-7	24.81	10.24
1-8	24.79	10.15
1-9	24.77	10.45
1-10	24.72	10.42
1-11	24.68	10.50
1-13	24.62	10.17

表 3-4 第二組試片尺寸

試片編號	試片寬度(cm)	試片厚度(cm)
2-2	24.76	10.42
2-3	24.75	10.26
2-4	24.76	10.30
2-5	24.82	10.46
2-6	24.79	10.45
2-8	24.77	10.30
2-9	24.82	10.42
2-10	24.85	10.43
2-11	24.86	10.48
2-12	24.81	10.34
2-13	24.78	10.45

表 3-5 第三組式片尺寸

試片編號	試片寬度(cm)	試片厚度(cm)
3-2	24.71	10.04
3-3	24.72	10.14
3-4	24.72	9.95
3-5	24.73	9.97
3-6	24.76	10.09
3-7	24.79	10.05



3-8	24.85	10.09
3-9	24.78	10.00
3-10	24.73	10.14
3-12	24.69	9.86
3-13	24.86	10.29

表 3-6 第四組試片尺寸

試片編號	試片寬度(cm)	試片厚度(cm)
4-5	24.78	10.42
4-6	24.72	10.36
4-7	24.79	10.30
4-8	24.75	10.48
4-9	24.86	10.43
4-10	24.69	10.43
4-12	24.76	10.42

表 3-7 廠商試片尺寸

試片編號	試片寬度(cm)	試片厚度(cm)
F1	25.14	11.08
F2	25.12	10.89
F3	25.09	10.98
T6	25.28	10.86
T8	25.17	10.91
T13	25.11	11.09
T14	25.14	11.12
T15	25.11	10.09
T16	25.19	10.87
T17	25.12	10.80
T18	25.07	10.96
T19	25.06	11.08
T20	25.08	11.12

3.3.5 彎曲試驗與疲勞試驗說明

本研究所進行之三點彎曲以及疲勞試驗均是使用 MTS-810 10 噸動態試驗機進行，如圖 3-22 所示，馬力由油壓系統驅動，彎曲試驗時藉由 MTS 控制器設定位移速率 1 mm/min，實驗所得之電子訊號可藉由 MTS Station 軟體將訊號轉換時間軸下對應之力荷重與位移數據，再經由 Matlab 數值計算軟體，將每個力對應到的位移數據繪製成力與位移圖及應力應變圖。疲勞試驗時，則是藉由 Multipurpose Elite 軟體進行，設定外力幅值、頻率以及中止循環次數，並自訂實驗停止條件，本研究中所使用的中止循環次數均為 10^8 ，但所有實驗過程中，並無試片超越中止循環次數，僅 2-6 試片為手動停止，並評估為永久壽命，因此除了 2-6 試片外，所有實驗均是由於達到疲勞破壞而停止。此外，本研究所執行之疲勞試驗的頻率選擇，除參考 ASTM 規範設計外，亦有針對黑潮測試機組進行模態分析，由於測試機組轉子尺寸較小，因此自然頻率較大，約 13.6 Hz，未來實際機組的尺寸若增加時，自然頻率的會隨之減小，為了解頻率與疲勞壽命關係，後續才會針對高頻的疲勞負載進行實驗探討，以確保於設計階段所進行的評估，是最保守的壽命評估。

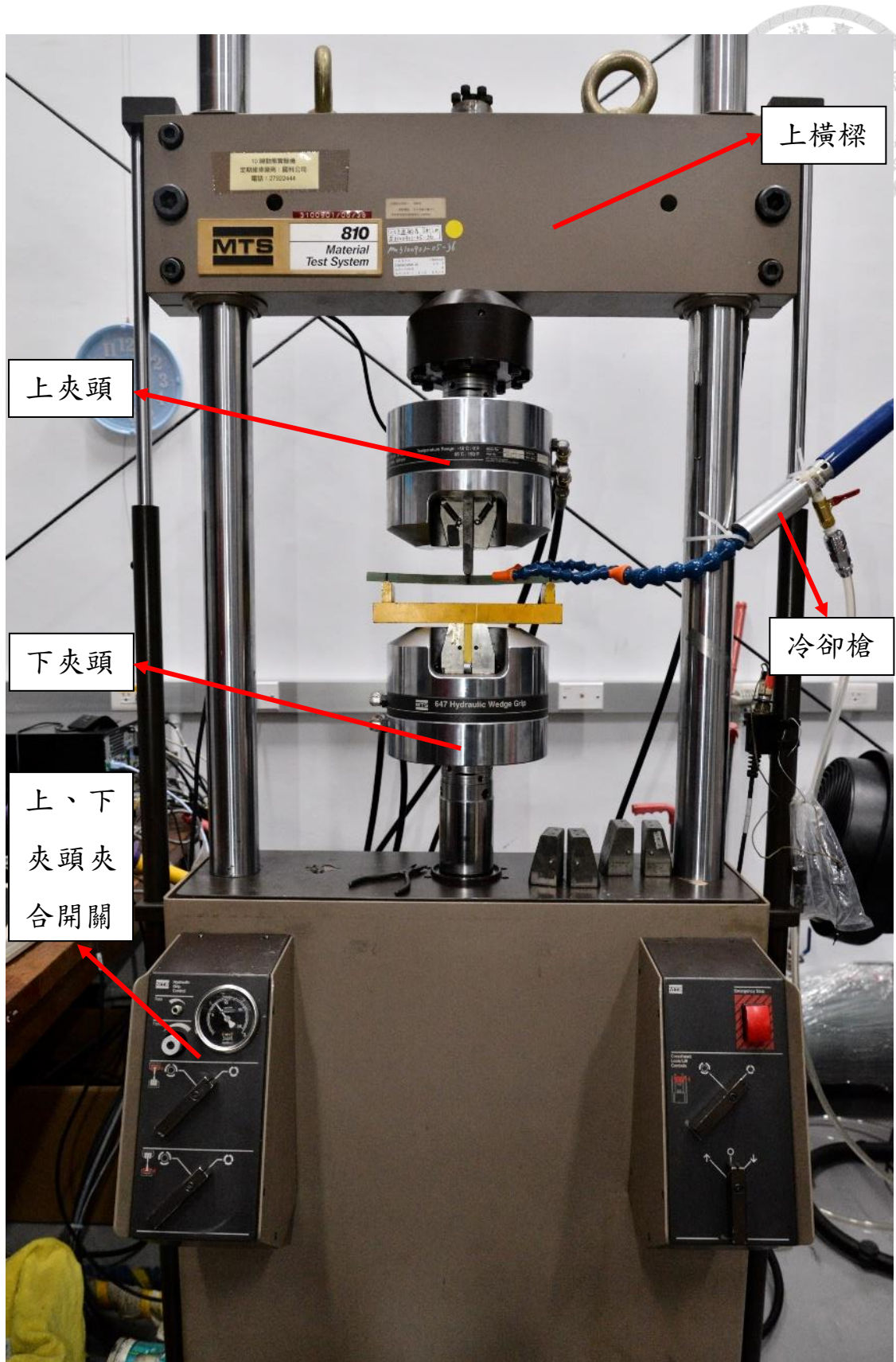


圖 3-22 MTS-810 材料試驗機及實驗配置

第4章 結果

本研究中，利用水浴槽進行海水老化的試片為第一組試片(1-3 除外)以及第三組試片(3-13 除外)，實驗結果分為兩個部分，第一個是彎曲試驗結果，藉由彎曲試驗的實驗結果，先利用古典積層板理論進行比較，確認實驗量測到的楊氏模數與理論值是否相吻合，用以避免製作過程的工藝，使得試片之間有過大的誤差，確認結果與理論值沒有過大的差異後，再進一步根據彎曲試驗結果選定後續適當的疲勞負載。第二個是疲勞試驗結果，分別進行了老化試片與未老化試片在 2Hz 的外力作用下的疲勞壽命量測，並且藉由控制外力頻率探討外力頻率對於試片溫度所造成的效應，並進一步了解對於試片疲勞壽命的影響，最後，使用冷卻鎗對試片進行持續性的降溫，排除外力頻率所造成的溫度效應，單純探討外力頻率與試片疲勞壽命的關係，其中，特別必須提到，進行溫度效應對於玻璃纖維複合材料的影響所使用的試片，是使用廠商的試片所進行，而非自製的試片。

4.1 彎曲試驗

自製未老化之複合材料的彎曲試驗結果如表 4-1 所記錄，自製試片的平均破壞荷重為 4805.2N，平均破壞應力為 549.61 MPa，實驗之力與位移圖與應力應變圖分別計錄於圖 4-1 與圖 4-2 中，再將圖 4-2 中各試片曲線斜率取出，此斜率即為自製試片之楊氏模數。

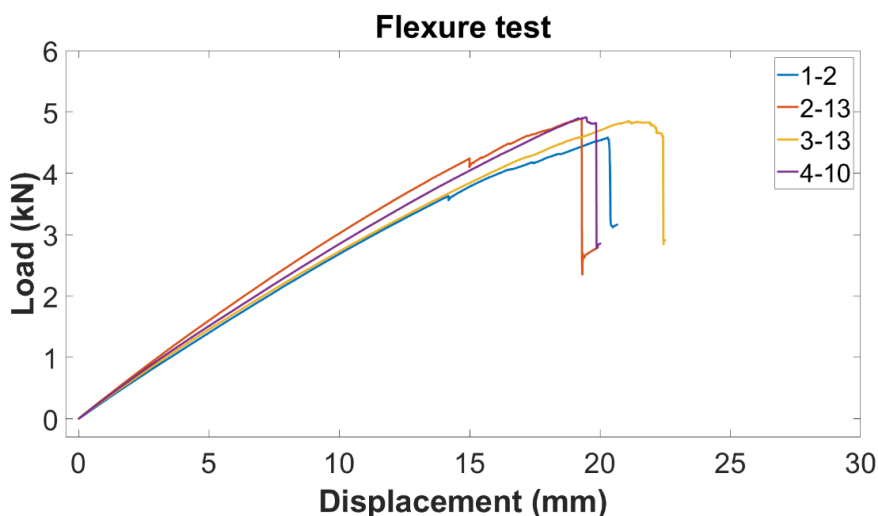


圖 4-1 自製未老化之複合材料彎曲試驗力與位移圖

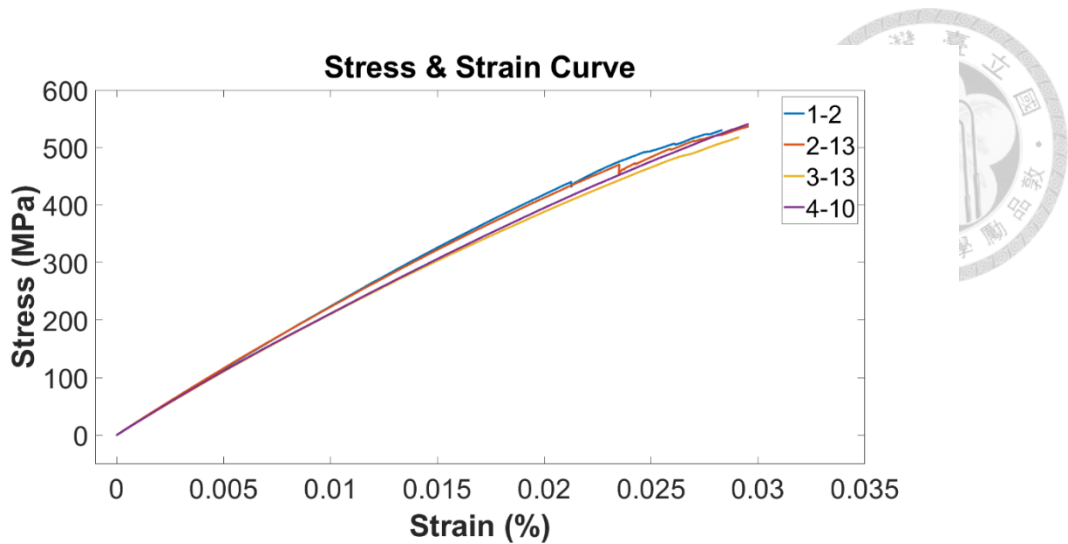


圖 4-2 自製未老化之複合材料彎曲試驗應力應變圖

表 4-1 自製未老化之複合材料彎曲試驗結果

試片編號	最大荷重(N)	破壞應力(MPa)	楊氏係數(MPa)	理論楊氏係數 (MPa)
1-2	4581.4	555.54	19189	16708
2-13	4881.1	541.58	18465	
3-13	4850.4	552.72	17850	
4-10	4907.7	548.61	18303	
平均	4805.2	549.61	18451	16708
標準差	150.99	6.06	556.16	X
變異係數	3.14%	1.10%	3.01%	X

自製老化之複合材料的彎曲試驗結果如表 4-2 所記錄，自製試片的平均破壞荷重為 3903.3N，平均破壞應力為 449.87 MPa，實驗之力與位移圖與應力應變圖分別計錄於圖 4-3 與圖 4-4 中，再將圖 4-4 中各試片曲線斜率取出，此斜率即為自製老化試片之楊氏模數。

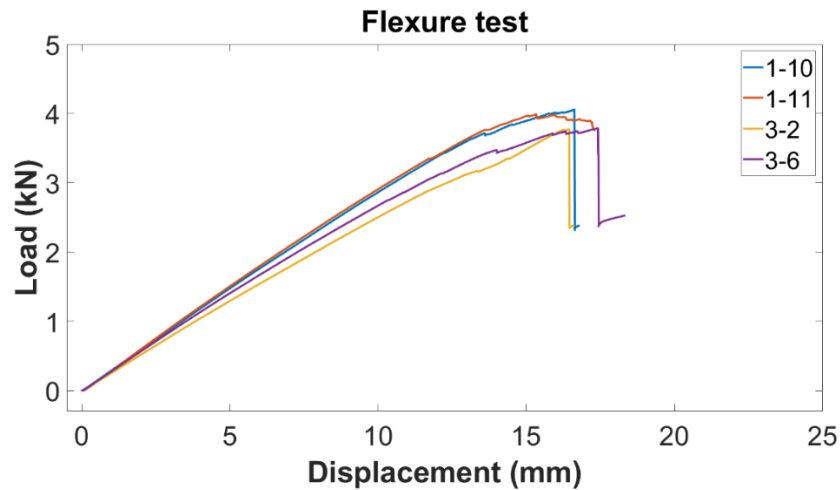


圖 4-3 自製老化之複合材料彎曲試驗力與位移圖

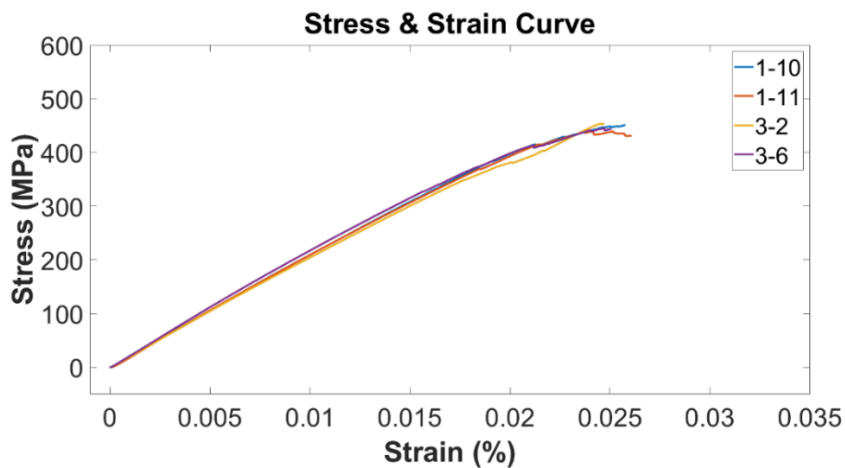


圖 4-4 自製老化之複合材料彎曲試驗應力應變圖

表 4-2 自製老化之複合材料彎曲試驗結果

試片編號	最大荷重(N)	破壞應力(MPa)	楊氏係數(MPa)	理論楊氏係數 (MPa)
1-10	4057.3	453.50	18539	16708
1-11	3989.9	440.19	18133	
3-2	3775.2	454.33	18509	
3-6	3790.5	451.47	18537	
平均	3903.3	449.87	18430	16708
標準差	141.83	6.57	198.14	X
變異系數	3.63%	1.46%	1.08%	X

廠商製作的複合材料彎曲試驗結果如表 4-3 所記錄，廠商製作試片的平均破壞荷重為 4090.4N，平均破壞應力為 404.86 MPa，實驗之力與位移圖與應力應變圖分別計錄於圖 4-5 與圖 4-6 中，再將圖 4-6 中各試片曲線斜率取出，此斜率即為廠商製試片之楊氏模數，從表 4-3 的結果中可以發現，廠商所製作之複合材料，在楊氏模數上與理論值有顯著差異，其楊氏模數與計算理論值 E22 的 13079 MPa 較為接近，因此將試片破壞形式進行比較，如圖 4-7，由圖 4-7 推論廠商試片 L900 纖維疊層方向應與自製試片所使用之疊層方向旋轉了 90 度，因此後續疲勞壽命曲線將不探討廠商製試片。

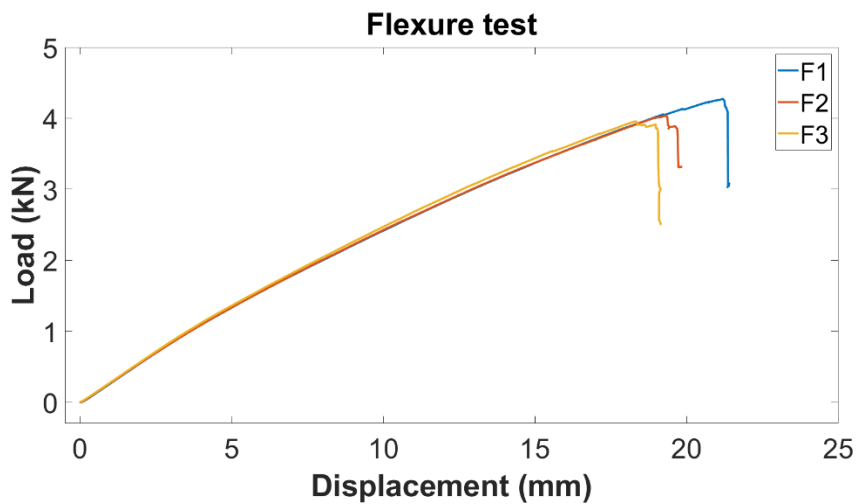


圖 4-5 廠商製複合材料彎曲試驗應力應變圖

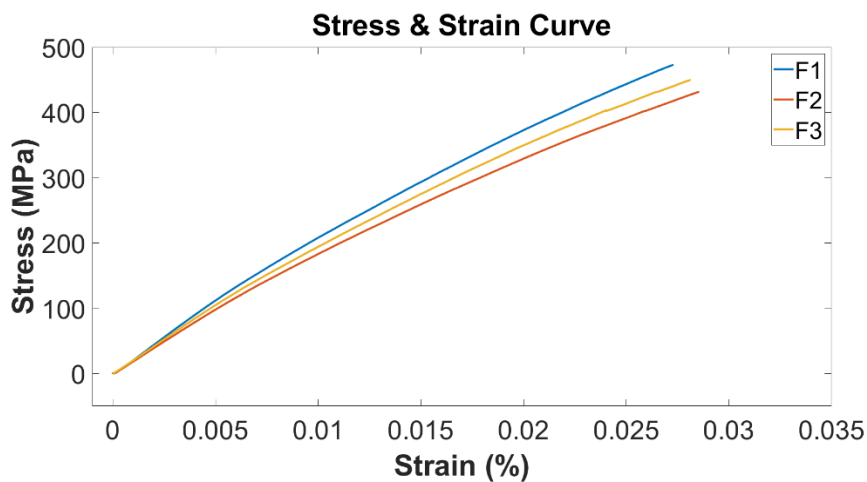


圖 4-6 廠商製複合材料彎曲試驗應力應變圖

表 4-3 廠商製複合材料彎曲試驗結果

試片編號	最大荷重(N)	破壞應力(MPa)	楊氏係數(MPa)	理論楊氏係數(MPa)
F1	4272.6	415.25	12395	
F2	4040.3	406.82	12878	16426
F3	3958.2	392.51	12971	
平均	4090.4	404.86	12750	16426
標準差	163.07	11.50	311.03	X
變異係數	3.99%	2.84%	2.44%	X

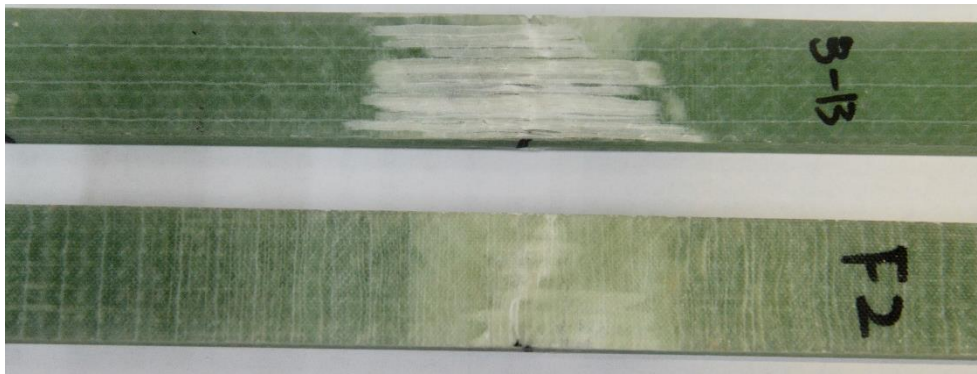


圖 4-7 自製試片與廠商製試片破壞形式比較

4.2 疲勞試驗

4.2.1 2Hz 疲勞試驗結果

本研究同時進行了自製複合材料試片未老化與老化後的疲勞試驗，參考 ASTM D7774 中所建議，外力加載頻率不超過 5 Hz 為建議使用頻率，因此本研究使用 2 Hz 進行頻勞試驗，加載外力之應力比均為 0.1，未老化試片與老化試片實驗結果如表 4-4 表 4-5 與所記錄，其中，表 4-4 的 2-6 試片為在經過 2500000 次循環後，仍未出現明顯裂紋，如圖 4-9，因此認定此應力範圍已低於試片之疲勞極限，視為永久壽命，此外，由表 4-5 及圖 4-10 可以觀察到試片 1-7 的循環次數較為不合理，因此在後續圖形繪製與討論中，將不使用試片 1-7 之數據，將兩組實驗循環應力正規化，並將依照實驗數據所計算出的 S-N curve 與剛性衰減曲線進行繪製，分別記錄於圖 4-8 與圖 4-11，未老化試片及老化試片之 S-N curve 比較，如圖 4-12。

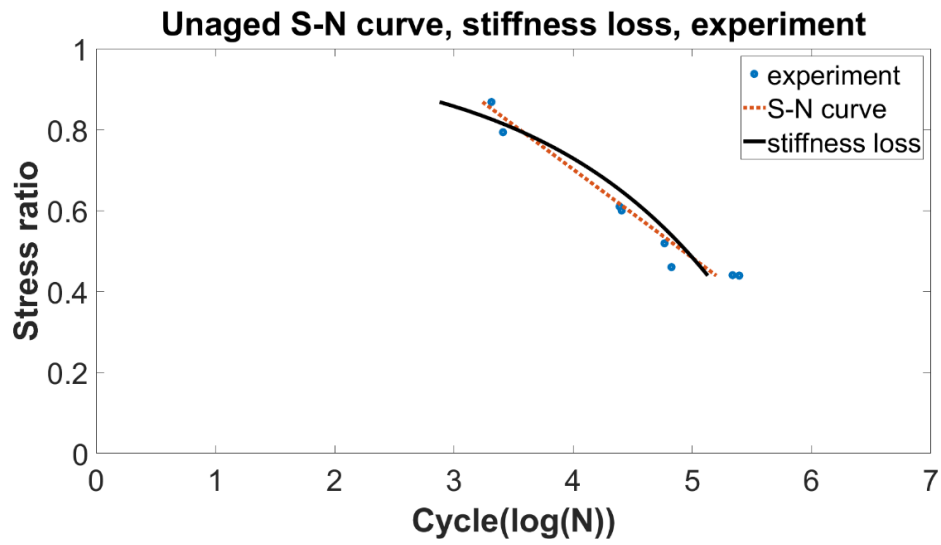
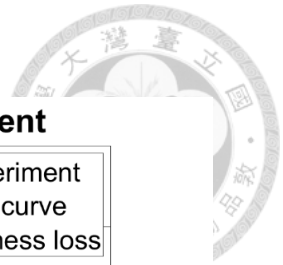


圖 4-8 未老化試片實驗、S-N curve 與剛性衰減曲線

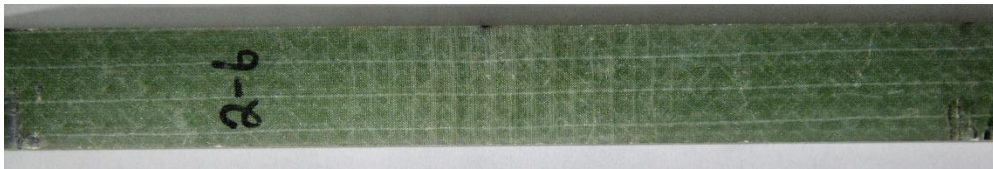


圖 4-9 試片 2-6 經 2500000 次循環後試片表面狀態

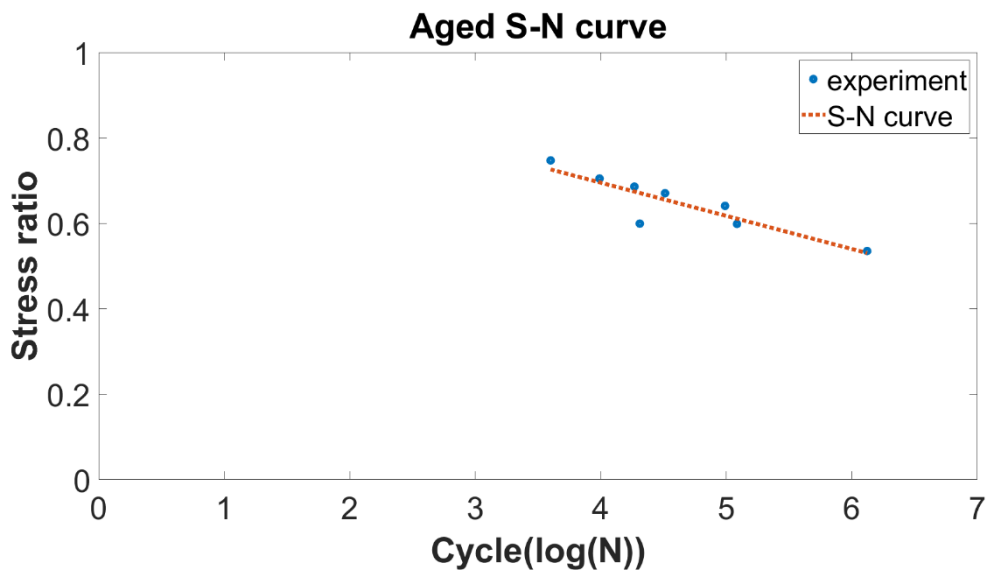


圖 4-10 老化試片疲勞試驗結果與 S-N curve

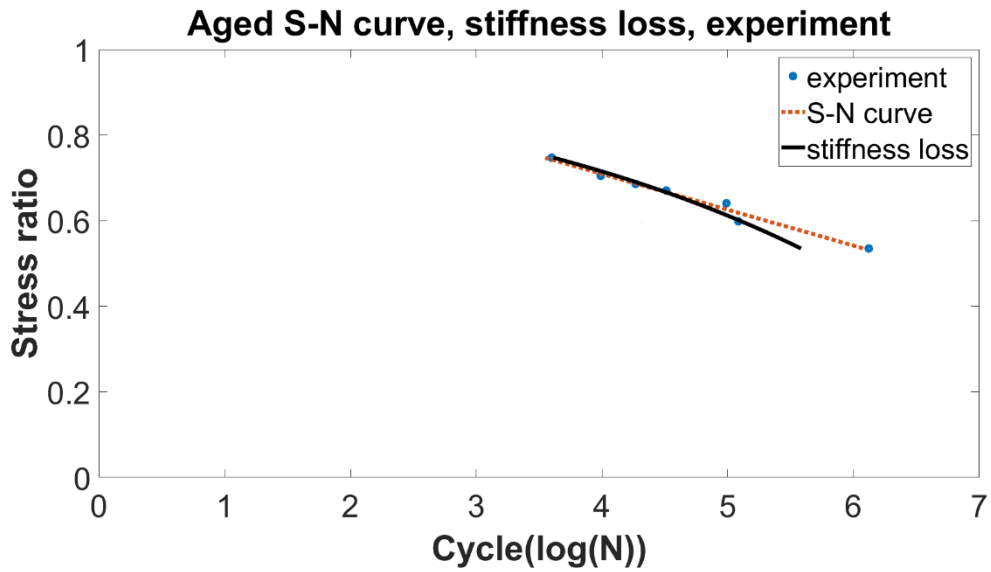


圖 4-11 老化試片實驗、S-N curve 與剛性衰減曲線

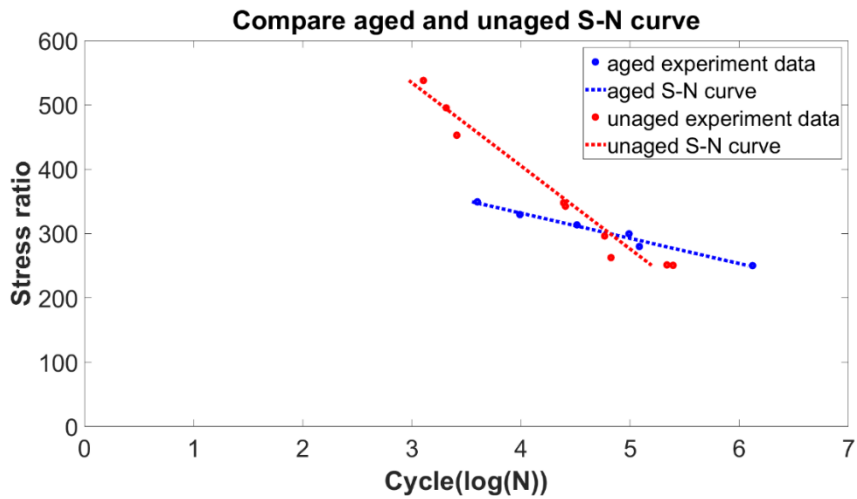


圖 4-12 未老化試片與老化試片 S-N curve 比較

表 4-4 未老化試片疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	循環次數(次)
2-2	225.0~2250	25.1~251	217157
2-3	466.6~4666	53.7~537	1276
2-4	433.3~4333	49.5~495	2062
2-5	237.5~2375	26.2~262	66729
2-6	140.0~1400	15.5~155	2500000+
2-8	300.0~3000	34.2~342	25518
2-9	225.0~2250	25.0~250	246837

2-10	266.6~2666	29.6~296	58338
2-11	316.6~3166	34.7~347	24532
2-12	400.0~4000	45.2~452	2579

表 4-5 老化試片疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	循環次數(次)
1-3	300.0~3000	34.9~349	3980
1-4	287.0~2870	31.5~315	32471
1-5	240.0~2400	28.0~280	121392
1-6	300.0~3000	32.0~320	18502
1-7	243.0~2430	28.0~280	20419
1-8	213.0~2130	25.0~250	1321172
1-9	270.0~2700	29.9~299	97549
1-13	280.0~2800	33.0~330	9762

4.2.2 不同外力加載頻率之疲勞試驗結果

本文除了進行 2 Hz 的疲勞試驗外，亦使用廠商所製作之試片進行了不同外力加載頻率的疲勞試驗，然而，在實驗過程中發現，當使用相同外力、不同加載頻率時，會使試片溫度有顯著的改變，進而影響材料的疲勞壽命，因此，在實驗的過程中使用 FLUKE Ti 450 進行溫度量測，裝置如圖 4-13，實驗結果計錄於中表 4-6，不同加載頻率使試片溫度上升，進而影響疲勞壽命如圖 4-14，後續探討將於第五章詳述。

表 4-6 相同外力、不同外力加載頻率之疲勞壽命

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
T8	1000~2000	100~200	2	187625
T13	1030~2060	100~200	6	103067
T14	1040~2080	100~200	8	63377
T15	1000~2000	100~200	10	60891
T16	1000~2000	100~200	12	36208
T6	995~1990	100~200	13.6	19468



圖 4-13 FLUKE Ti450

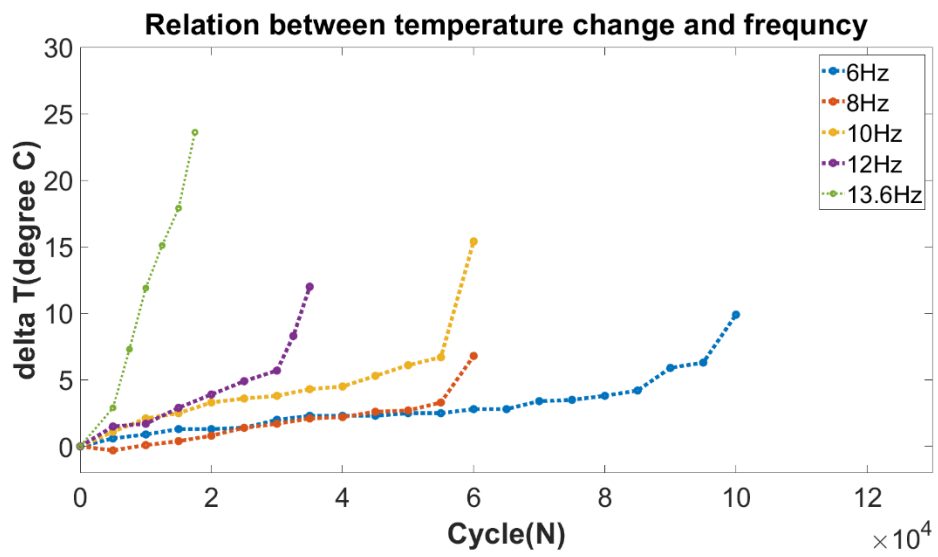


圖 4-14 不同頻率溫度變化及疲勞壽命關係

第5章 討論



5.1 試片強度

表 5-1 為自製之玻璃纖維複合材料試片極限強度及楊氏模數比較，根據實驗結果，可以清楚的觀察到試片在老化後，極限破壞強度有約 18% 的下降，而楊氏模數並未因試片老化而發生改變。此外，本研究亦觀察了試片的破壞形式，發現當試片進行海水老化前，破壞會發生於三點彎曲的壓縮面，如圖 5-1，然而經過加速老化後的試片，破壞位置也會逐漸轉變至拉伸面，如圖 5-2，此結果與文獻[45]中所得結果一致，試片再經過老化後，強度均會下降且破壞方式將由壓縮破壞轉為拉伸破壞。

表 5-1 試片比較表

試片種類	平均極限強度(MPa)	平均楊氏模數(MPa)
自製未老化試片	549.61	18451
自製老化試片	449.87	18430

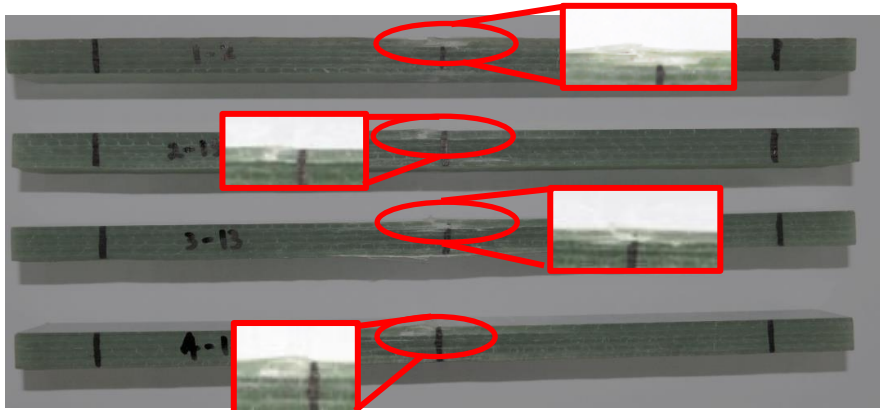


圖 5-1 未老化試片彎曲試驗破壞位置

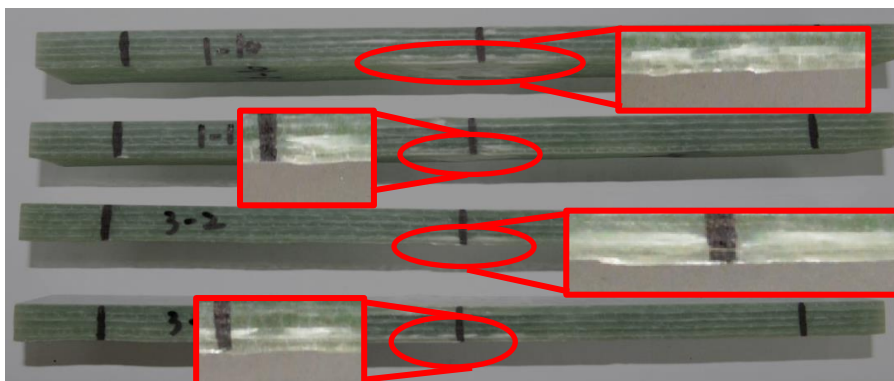


圖 5-2 老化試片彎曲試驗破壞位置

會出現上述破壞形式轉變的原因，應是由於複合材料在老化的過程當中，纖維由於老化而使得結構強度減弱，在文獻[48]中亦有提及，樹脂在浸泡於水中後，其韌性(toughness)會有所增加，如圖 5-3，因此破壞位置由未老化時的壓縮面，在經老化後轉變為拉伸面，應是由於纖維強度減弱且樹脂韌性增強所造成。

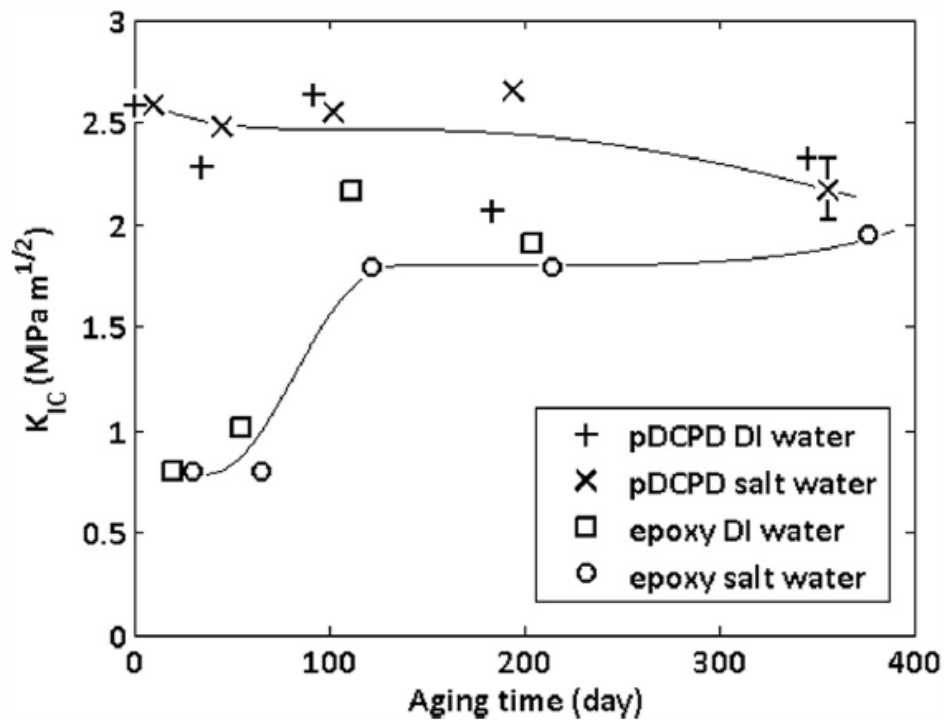


圖 5-3 [48]所呈現結果

5.2 疲勞壽命

5.2.1 實驗值、S-N curve 與剛性衰減模型

首先，由圖 4-12 中可以觀察到，未老化與老化之複合材料試片之 S-N curve，在循環應力低於 300 MPa 時，老化試片的疲勞壽命反倒會較未老化試片表現更為出色，此現象的原因可以由上節所提到的圖 5-3 來解釋，由於在高應力的低週疲勞時，主導複合材料疲勞壽命的因素是纖維，然而，在低應力的高週疲勞時，主導複合材料疲勞壽命的因素為基材，因此，當試片進行老化過後，樹脂基材的韌性提升，使得複合材料在低應力的高週疲勞上有更好的表現。此外，本節比較了實驗值與 S-N curve 及剛性衰減模型之間的誤差，未老化試片之結果紀錄於表 5-2，老化試片之比較結果紀錄於表 5-3。

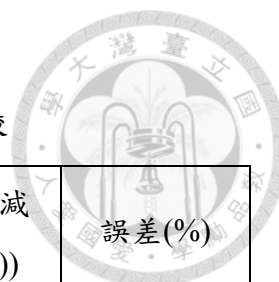


表 5-2 未老化試片理論值與實驗結果誤差比較

應力比 $\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right)$	實驗值 (log(N))	S-N curve (log(N))	誤差(%)	剛性衰減 (log(N))	誤差(%)
0.439	5.392	5.201	3.54	5.129	4.88
0.440	5.337	5.196	2.64	5.126	3.95
0.460	4.824	5.105	-5.83	5.069	-5.08
0.519	4.766	4.836	-1.47	4.890	-2.60
0.600	4.407	4.466	-1.34	4.603	-4.45
0.610	4.390	4.420	-0.68	4.565	-3.99
0.794	3.411	3.579	-4.93	3.5725	-4.73
0.868	3.314	3.241	2.20	2.882	13.04

表 5-3 老化試片理論值與實驗結果誤差比較

應力比 $\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right)$	實驗值 (log(N))	S-N curve (log(N))	誤差(%)	剛性衰減 (log(N))	誤差(%)
0.535	6.121	6.090	0.51	5.980	2.30
0.599	5.084	5.325	-4.74	5.356	-5.35
0.641	4.989	4.823	3.33	4.889	2.00
0.670	4.511	4.477	0.75	4.534	-0.51
0.686	4.267	4.286	-0.45	4.325	-1.36
0.705	3.990	4.059	-1.73	4.061	-1.78
0.747	3.600	3.557	1.19	3.414	5.17

由表 5-2 及表 5-3 的比較結果可見，不論 S-N curve 與剛性衰減模型與實驗值比較，除了剛性衰減理論在未老化試片，應力比為 0.868 時，有 13.04% 的誤差，其餘數據誤差都在 6% 以內，因此，兩者在結構初步設計階段時，皆可作為有效的參考依據。



5.2.2 疲勞破壞位置

從未老化試片疲勞試驗的結果中，可以發現試片破壞形式亦有所差異，在較高的循環應力(試片 2-3、2-4、2-12)，約極限應力 75%以上時，可以發現發生疲勞破壞的位置是在試片的壓縮面，如圖 5-4，但當應力低於 75%時，發生疲勞破壞的區域則轉變為在拉伸面受到破壞，如圖 5-5。

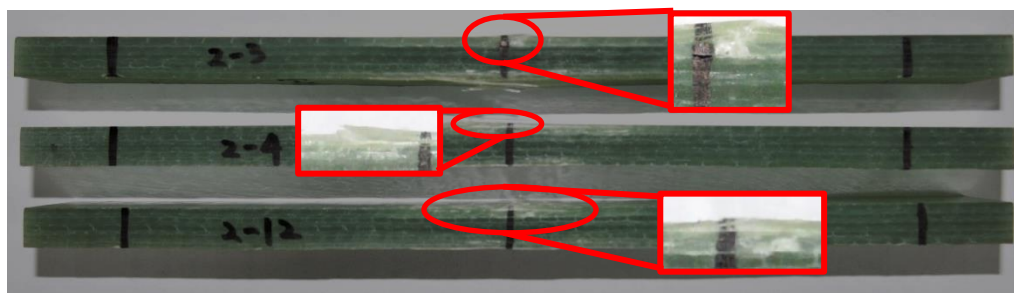


圖 5-4 高循環應力試片破壞位置

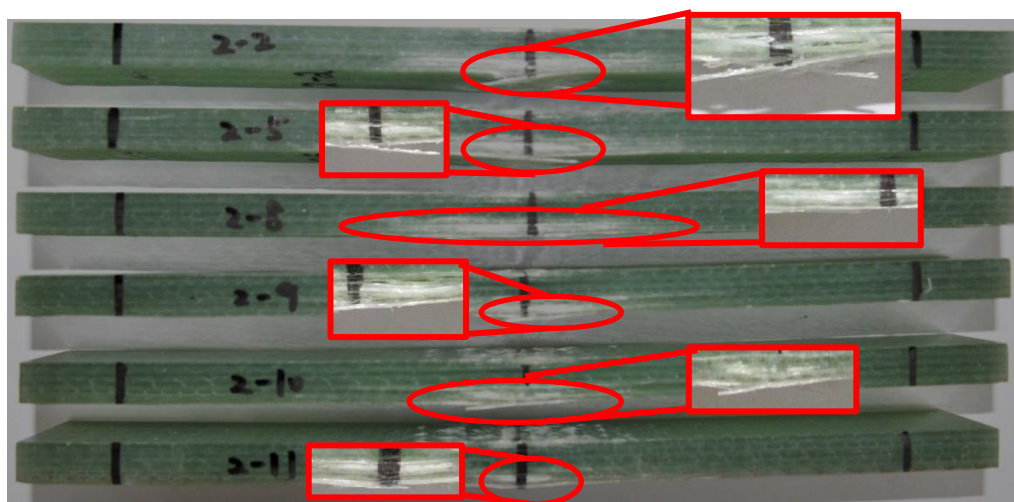


圖 5-5 較低循環應力試片破壞位置

在老化試片的疲勞試驗結果中，則會看到試片在拉伸面與壓縮面均有出現疲勞破壞，如圖 5-6，其中，特別值得一提的是，在循環應力高於極限應力 75%的試片 1-3，仍然在拉伸及壓縮面均有出現疲勞破壞的現象，此部分與未老化試片的破壞有所差異。

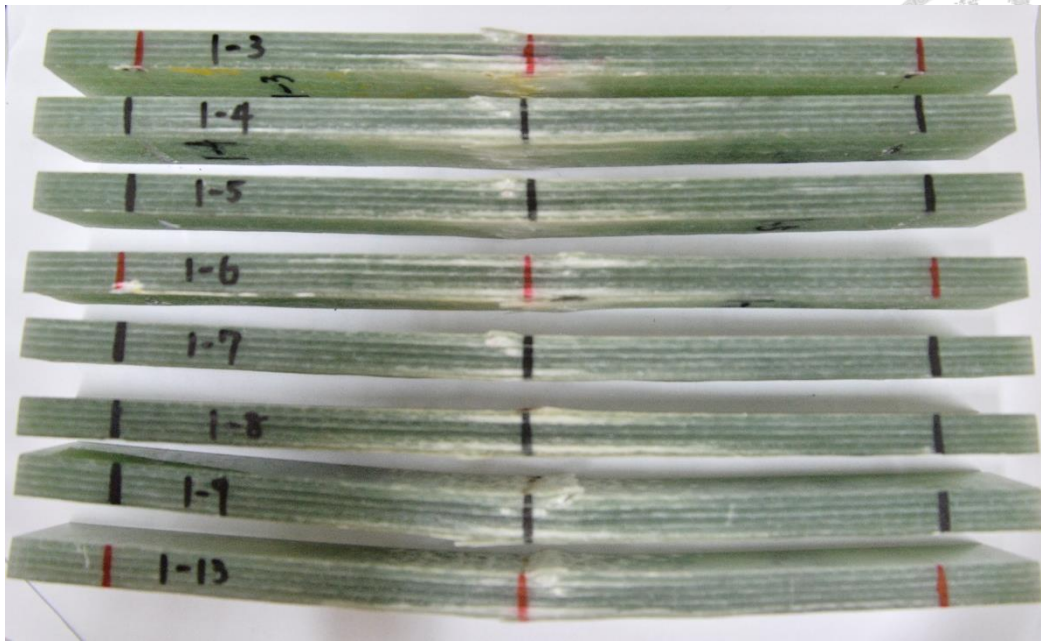


圖 5-6 老化試片破壞位置

5.2.3 降溫測試

在章節 4.2.2 中，我們由實驗結果發現了隨著外力頻率增加，試片在疲勞試驗進行中，溫度會有顯著的上升，因此，為單純的了解頻率與疲勞壽命之關係，後續在進行疲勞試驗時，使用 EXAIR Model 3725 冷卻槍進行降溫，裝置如圖 5-7，透過持續吹拂 20°C 的冷空氣，達到降溫的效果。為測試此方法是否能夠有效將溫度控制在一定範圍內，使用廠商試片進行了 6Hz 與 10Hz 的實驗，用以確保此方法能夠具有降溫效果，測試所得之實驗數據紀錄於表 5-4，6Hz 與 10Hz 實驗過程溫度變化如圖 5-8 與圖 5-9，兩者比較如圖 5-10。



圖 5-7 冷卻槍



表 5-4 降溫測試實驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
T19	300~3000	29~290	6	11128
T20	298~2980	29~290	10	13365

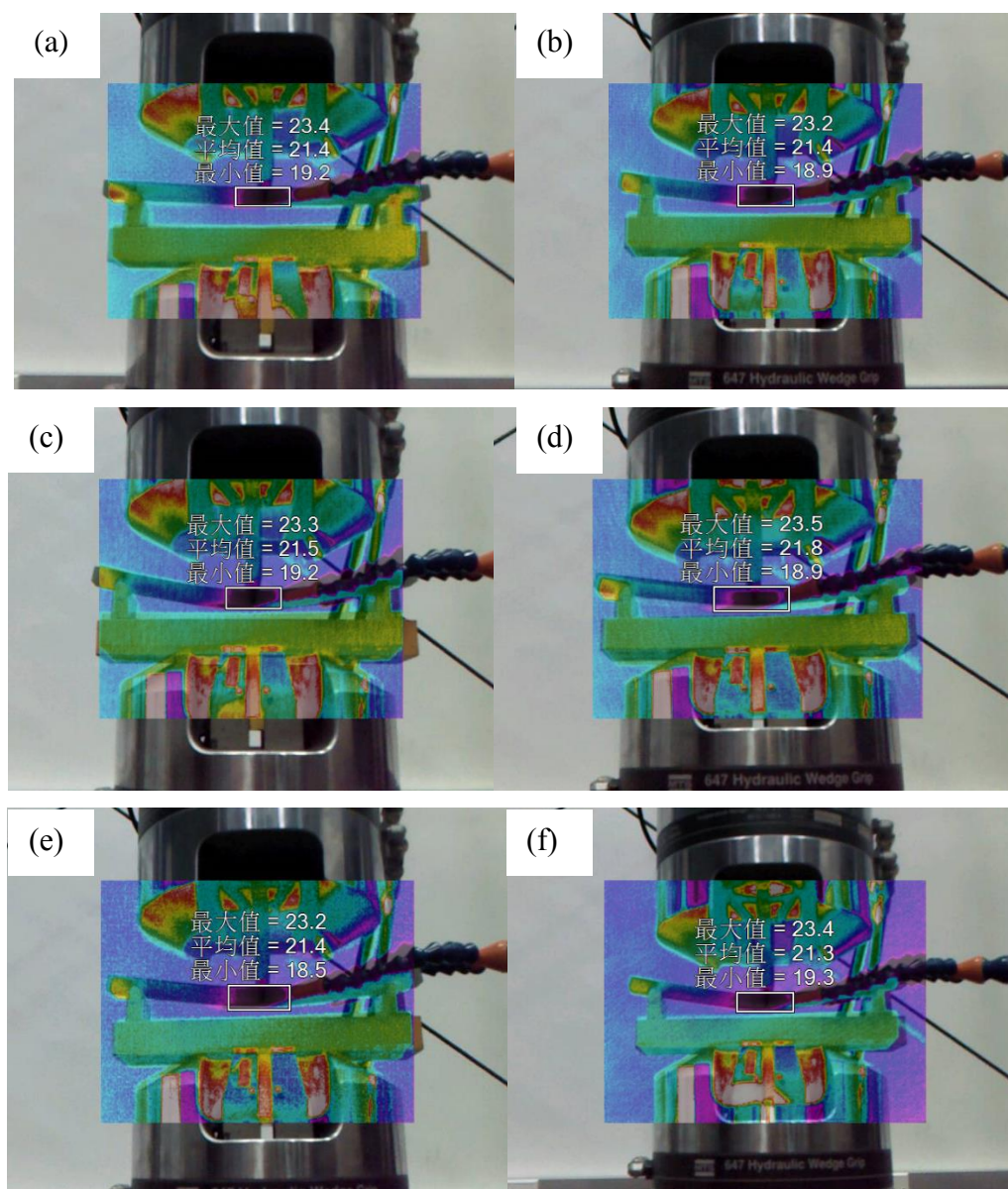


圖 5-8 6Hz 溫度變化

(a) 0 cycle (b) 2500 cycle (c) 5000 cycle
 (d) 7500 cycle (e) 10000 cycle (f) 11128 cycle

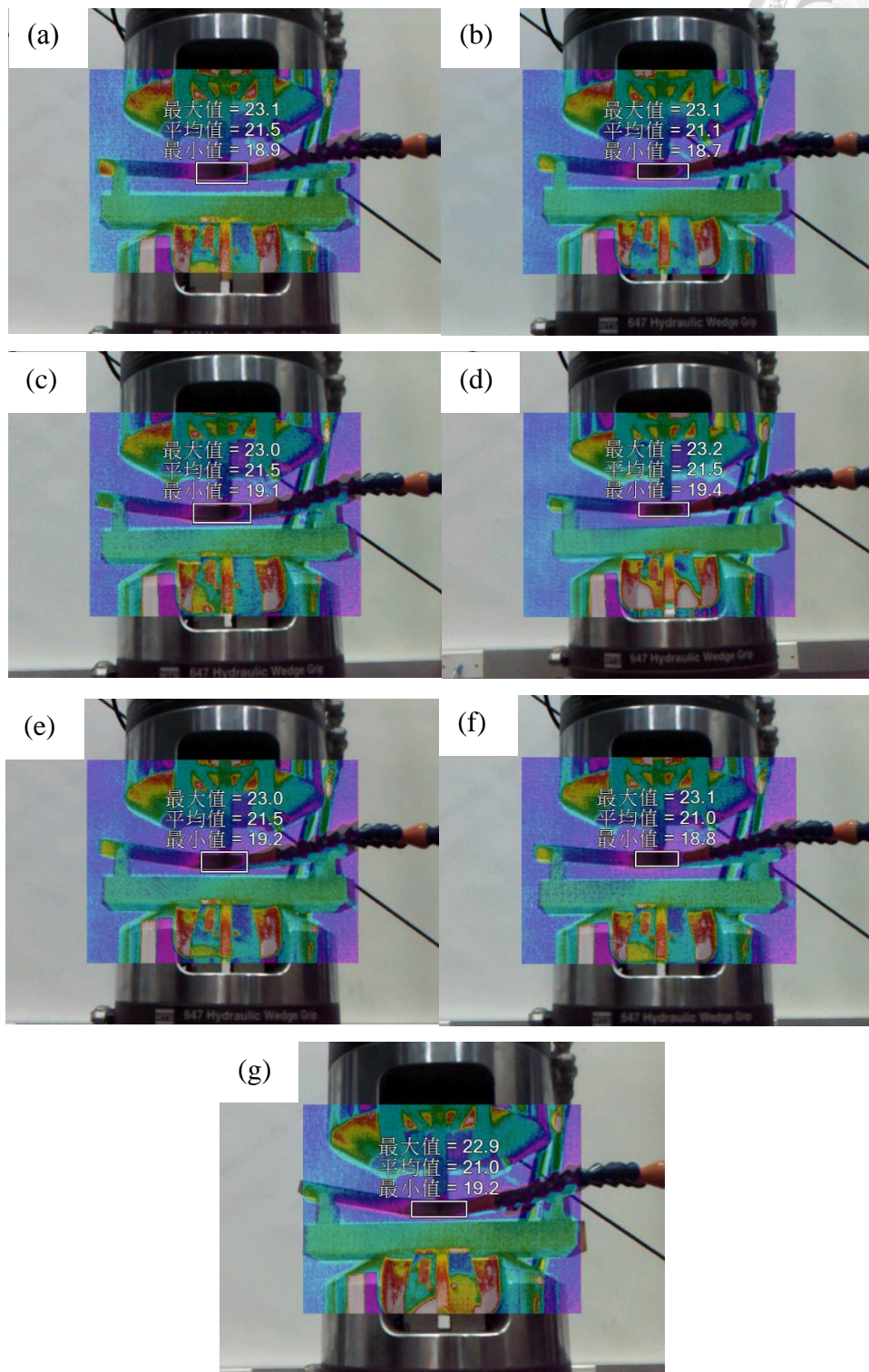


圖 5-9 10Hz 溫度變化

(a) 0 cycle (b) 2500 cycle (c) 5000 cycle

(d) 7500 cycle (e) 10000 cycle (f) 12500 cycle (g) 13365 cycle

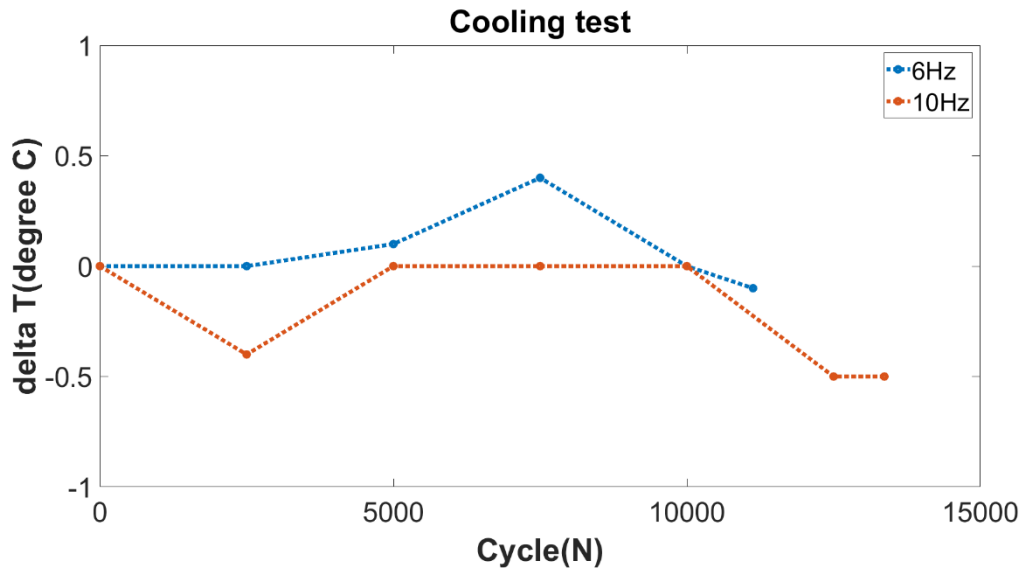


圖 5-10 冷卻試片溫度變化比較

文獻[57]中的研究結果發現，在較高的循環應力時，溫度上升會較明顯，且上升幅度會隨著頻率增加而增加，本次進行測試所使用的應力，為極限應力的 72%，理論上在實驗進行的過程中，試片溫度應有顯著的上升，但在透過冷卻槍降溫後的結果中，可以觀察到溫度幾乎沒有改變，變化幅度僅在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 間，因此，可以推論此降溫方法能夠有效降溫。

5.2.4 降溫之疲勞試驗

本節將討論的內容為不同加載頻率下，進行降溫後的疲勞壽命表現，雖已確定使用冷卻槍吹拂試片具有足夠的降溫效果，仍先使用廠商試片進行測試，用以了解頻率上升之趨勢，測試結果紀錄於表 5-5。

表 5-5 降溫後 13.6Hz 疲勞壽命

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
T17	980~1960	100~200	13.6	656629
T18	1010~2020	100~200	13.6	889057

將表 4-6 中未降溫的疲勞試驗結果，與表 5-5 中降溫後的疲勞試驗結果互相比較，紀錄於表 5-6。

表 5-6 相同循環應力及頻率下降溫與未降溫疲勞試驗比較

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
T6	995~1990	100~200	13.6	19468
T17	980~1960	100~200	13.6	656629
T18	1010~2020	100~200	13.6	889057

由表 5-6 中可以觀察到，當試片進行降溫後，疲勞壽命會有十分顯著的提升，也進一步證明了，當複合材料試片在試驗進行的過程中，若有溫度變化產生，則疲勞壽命會受到顯著的影響。

確認了冷卻後的疲勞壽命趨勢後，使用自製的未老化複合材料試片進行冷卻疲勞試驗的頻率比較測試，實驗結果依照循環應力 342 MPa(60%極限應力)、296MPa(52%極限應力)與 262MPa(46%極限應力)分別紀錄於表 5-7、表 5-8 與表 5-9，比較結果如圖 5-11；亦使用自製的老化複合材料試片進行冷卻疲勞試驗的頻率比較測試，實驗結果依照循環應力 330MPa(70%極限應力)、315MPa(67%極限應力)與 280MPa(60%極限應力)分別紀錄於表 5-10、表 5-11 與表 5-12，比較結果如圖 5-12。

表 5-7 未老化試片循環應力 342MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
2-8	300.0~3000	34.2~342	2	25518
4-5	307.0~3070	34.2~342	6	36352
4-8	310.0~3100	34.2~342	10	46632

表 5-8 未老化試片循環應力 296MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
2-10	266.6~2666	29.6~296	2	58338
4-6	262.0~2620	29.6~296	6	81478
4-7	260.0~2600	29.6~296	10	123687



表 5-9 未老化試片循環應力 262MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
2-5	237.5~2375	26.2~262	2	66729
4-9	237.0~2370	26.2~262	6	157412
4-12	235.0~2350	26.2~262	10	221708

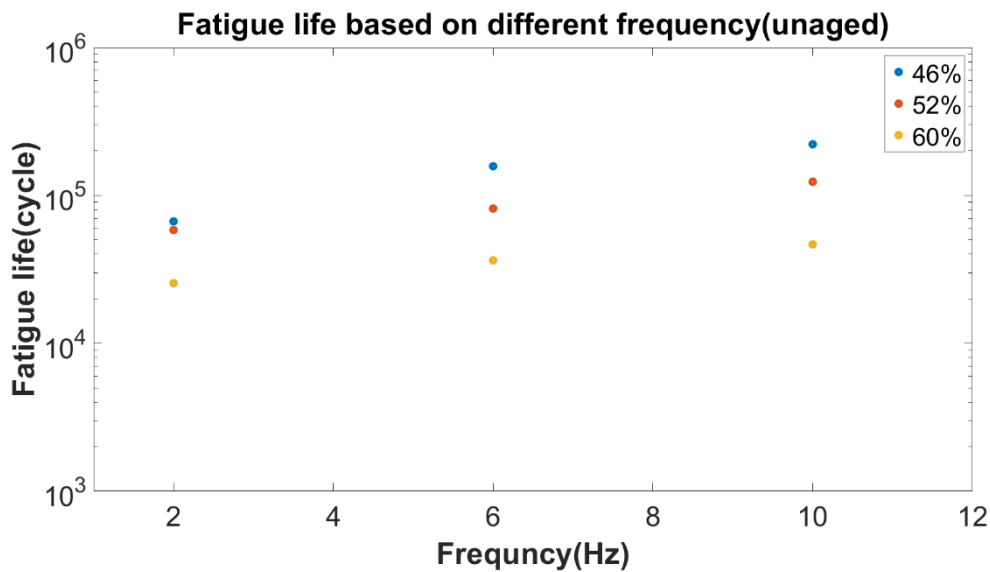


圖 5-11 未老化試片降溫疲勞壽命與頻率關係

表 5-10 老化試片循環應力 330MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
1-13	280.0~2800	33.0~330	2	9762
3-4	270.0~2700	33.0~330	6	17731
3-7	276.0~2760	33.0~330	10	57406

表 5-11 老化試片循環應力 315MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
1-4	287.0~2870	31.5~315	2	32471
3-8	265.0~2650	31.5~315	6	50192
3-9	260~2600	31.5~315	10	106189



表 5-12 老化試片循環應力 280MPa 於不同加載頻率之降溫疲勞試驗結果

試片編號	循環荷重(N)	循環應力(Mpa)	使用頻率(Hz)	循環次數(次)
1-5	240.0~2400	28.0~280	2	121392
3-5	230.0~2300	28.0~280	6	173543
3-12	224.0~2240	28.0~280	10	245728

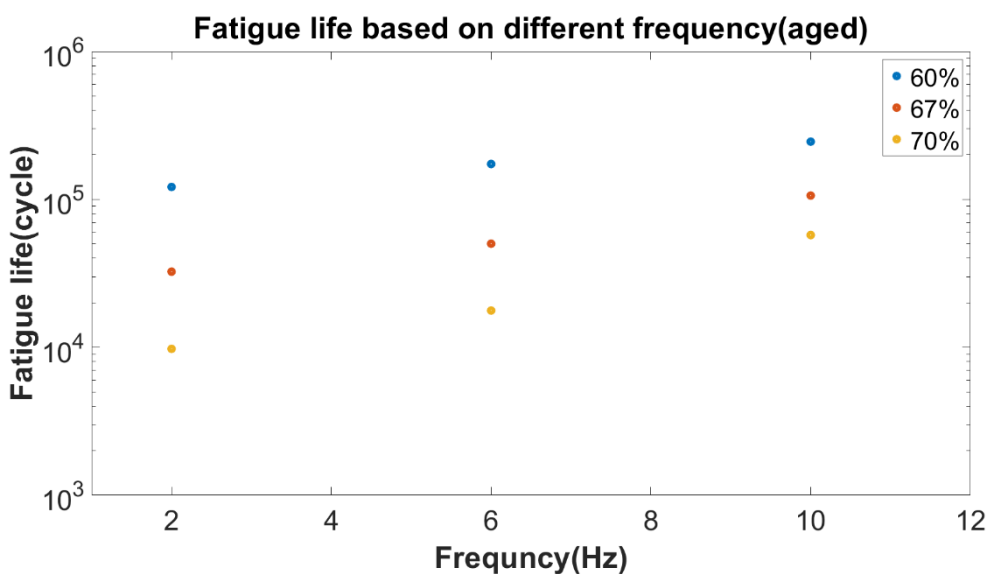


圖 5-12 老化試片降溫疲勞壽命與頻率關係

由上述結果可以觀察到，進行降溫後的疲勞試驗，當加載頻率增加時，疲勞壽命亦會隨之增加，此結果與文獻[4]中所提及的結論相吻合，當頻率越高時，裂紋增長的速率會隨之下降，因此，疲勞壽命亦會隨之增加。除此之外，綜合 4.2.2 節與 5.2.3 節之結果，可觀察到本研究所使用之複合材料，其疲勞壽命與溫度有顯著的關係。

第6章 結論與未來展望



6.1 結論

本研究內容為探討玻璃纖維複合材料葉片，以實驗的方法進行玻璃纖維複合材料在海水老化，比較老化前後材料性質的差異，並探討其疲勞性質的差異，最後，再進一步改變外力加載頻率，比較不同外力加載頻率下疲勞性質的差異，同時，再比較使用冷卻槍進行降溫之疲勞性質，排除溫度因素對疲勞壽命造成的影響

本研究之重要成果如下：

1. 玻璃纖維複合材料試片在 3.5psu、65.9°C 的海水中老化 512 小時後，其楊氏模數並不會有所改變，但極限強度會有 18% 的下降。老化前的複合材料試片進行彎曲試驗時，破壞面會發生在壓縮面，而老化後的複合材料試片進行彎曲試驗時，破壞面則是發生在拉伸面。
2. 玻璃纖維複合材料試片在經海水老化後，其高循環應力的低週疲勞表現會有顯著下降，但在低循環應力的高週疲勞表現會提升，此項差異與使用樹脂作為基材的有關。
3. 比較 S-N curve 及剛性衰減理論與實驗值的差異時發現，兩者均提供了一定的準確度，誤差均小於 6%，唯未老化試片在應力比為 0.868 時，剛性衰減理論的誤差達到 13.04%。在結構設計初期，兩種理論仍能夠提供具有參考性的疲勞壽命預測。
4. 未老化之玻璃纖維複合材料試片，在進行循環應力為極限應力 75% 以上的疲勞試驗時，其破壞位置會發生在壓縮面，而在循環應力低於 75% 時，發生疲勞破壞的位置則是在拉伸面。然而，經海水老化後的玻璃纖維複合材料試片，疲勞破壞在拉伸面與壓縮面均會發生。
5. 使用高頻進行疲勞試驗時，會使玻璃纖維複合材料試片溫度升高，造成玻璃纖維複合材料試片疲勞壽命降低，其溫度上升速率會隨著頻率升高而增快，疲勞壽命則隨著溫度升高而降低。
6. 進行疲勞試驗時，使用冷卻槍進行降溫，可有效的幫助玻璃纖維複合材料試片散熱，使其在進行較高頻率的疲勞試驗時，仍能維持在固定溫度。使用冷

卻槍進行降溫的疲勞試驗，玻璃纖維複合材料試片疲勞壽命會隨頻率增加而增加。



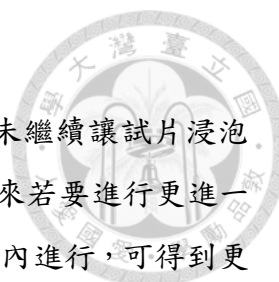
本研究之結論如下：

1. 經海水老化後的玻璃纖維複合材料試片，其材料楊氏模數沒有顯著改變，然而極限強度會有所下降，且進行三點彎曲實驗時破壞位置會發生改變。
2. S-N curve 與剛性衰減理論均能在設計初期作為參考結果。
3. 在排除溫度效應後，玻璃纖維複合材料疲勞壽命將隨頻率增加而增加，因此在設計初期時，應進行低頻實驗才能有較保守的壽命預測結果。

6.2 未來展望

本研究雖進行了許多關於複合材料疲勞壽命的探討，但仍有許多不足即可以修正的地方，因此，本節將列出目前成果可能的問題，以及後續可以進一步研究的未來工作：

1. 本研究所進行之疲勞壽命組數過少，然而，在許多文獻中都有顯示複合材料在進行疲勞試驗時會有不少的誤差，在規範中有提及每 10 倍的壽命區間，須進行三組試片的疲勞試驗，且在試片循環次數超過 10^8 時方為材料的疲勞極限，然而，由於時間考量，本研究中在試片循環次數達 2500000 時自行判斷其為疲勞極限，未來若時間允許的條件下，可進行符合規範的疲勞試驗，能得到更具代表性之結果。
2. 本研究進行疲勞試驗的方法為三點彎曲，三點彎曲在給試片應力時，需要的變位較拉伸試驗及四點彎曲大，因此，在進行高頻試驗時若要給予較大的力，MTS 810 將無法達成，因此，未來若有要進行較高頻率的疲勞試驗時，建議可使用拉伸試驗或四點彎曲進行。
3. 本研究所進行的加速老化試驗，所使用的並非真正的海水進行老化，雖是使用海鹽進行配置，但可能仍有許多條件與自然中的海水有所落差，對於試片造成的影響亦可能有所差異，因此，後續若要進行更準確的研究，應使用天然的海



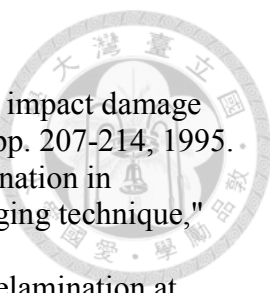
水進行。

4. 本研究進行經海水老化後的複合材料試片疲勞試驗時，並未繼續讓試片浸泡於海水當中，可能造成試片在試驗的過程中有水分散失，未來若要進行更進一步的研究時，應使試片在試驗的過程中，仍然浸泡於海水之內進行，可得到更準確的實驗數據。
5. 本研究所進行的溫度探討試驗中，礙於試片數量不足的因素，並非使用自製的試片進行，是屬外插式的驗證，且使用冷卻槍進行降溫，與實際黑潮渦輪發電機工作環境散熱方式有所落差，若要進行更精確的探討，英對於散熱方式作一改良。
6. 本研究進行加速老化試驗，但未進行腐蝕試驗，未來若要進行全面性的分析時，應再多比較玻璃纖維複合材料試片在經腐蝕前後，其材料性質及疲勞壽命的差異。

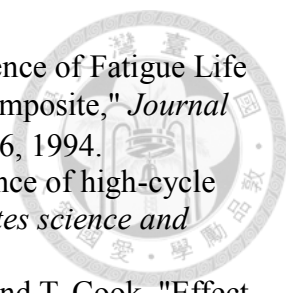
參考文獻



- [1] (2017). 洋流與氣候. Available: http://pei.cjhh.tc.edu.tw/~pei/climate/climate_1_explain.htm
- [2] T. G. S. Turbine. (2017). *The gulf stream turbine*. Available: <http://wdstudio.net/gulfstreamturbine/index.htm>
- [3] C. Hsin, S. Wang, J. Chen, and F. Chiu, "DESIGN OF FLOATING KUROSHIO TURBINE BLADE GEOMETRIES," *中國造船暨輪機工程學刊*, vol. 35, no. 3, pp. 145-153, 2016.
- [4] C. Sun and W. Chan, "Frequency effect on the fatigue life of a laminated composite," in *Composite materials: testing and design (fifth conference)*, 1979: ASTM International.
- [5] P. G. Bergan, L. Buene, A. T. Echtermeyer, and B. Hayman, "Assessment of FRP sandwich structures for marine applications," *Marine structures*, vol. 7, no. 2-5, pp. 457-473, 1994.
- [6] P. Brøndsted, H. Lilholt, and A. Lystrup, "Composite materials for wind power turbine blades," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 35, pp. 505-538, 2005.
- [7] P. Davies, G. Germain, B. Gaurier, A. Boisseau, and D. Perreux, "Evaluation of the durability of composite tidal turbine blades," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 371, no. 1985, p. 20120187, 2013.
- [8] J. Seferis, "The role of the polymeric matrix in the processing and structural properties of composite materials." *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [9] t. J. C. f. M. Association. (2017). *Aircraft and Aerospace Fields*. Available: <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/field/craft.html>
- [10] R. Martin and D. Evans, "Reducing costs in aircraft: the metals affordability initiative consortium," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 52, no. 3, pp. 24-28, 2000.
- [11] J. Bijelic-Donova, S. Garoushi, P. K. Vallittu, and L. V. Lassila, "Mechanical properties, fracture resistance, and fatigue limits of short fiber reinforced dental composite resin," *The Journal of prosthetic dentistry*, vol. 115, no. 1, pp. 95-102, 2016.
- [12] M. Kashtalyan and C. Soutis, "Stiffness and fracture analysis of laminated composites with off-axis ply matrix cracking," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 4, pp. 1262-1269, 2007.
- [13] S. Kobayashi, K. Terada, S. Ogihara, and N. Takeda, "Damage-mechanics analysis of matrix cracking in cross-ply CFRP laminates under thermal fatigue," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 12, pp. 1735-1742, 2001.
- [14] A. Todoroki, K. Omagari, Y. Shimamura, and H. Kobayashi, "Matrix crack detection of CFRP using electrical resistance change with integrated surface probes," *Composites science and technology*, vol. 66, no. 11, pp. 1539-1545, 2006.
- [15] E. Sevkat, J. Li, B. Liaw, and F. Delale, "A statistical model of electrical resistance of carbon fiber reinforced composites under tensile loading," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 2214-2219, 2008.
- [16] P. Berbinau, C. Soutis, and I. Guz, "Compressive failure of 0 unidirectional carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) laminates by fibre microbuckling," *Composites Science and technology*, vol. 59, no. 9, pp. 1451-1455, 1999.
- [17] Y. Qinlu, L. Yulong, L. Hejun, L. Shuping, and G. Lingjun, "Quasi-static and dynamic compressive fracture behavior of carbon/carbon composites," *Carbon*,

- 
- vol. 46, no. 4, pp. 699-703, 2008.
- [18] S. A. Hitchen and R. Kemp, "The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite," *Composites*, vol. 26, no. 3, pp. 207-214, 1995.
- [19] M. Seif, U. Khashaba, and R. Rojas-Oviedo, "Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique," *Composite structures*, vol. 79, no. 1, pp. 113-118, 2007.
- [20] D. D. Samborsky, T. J. Wilson, P. Agastra, and J. F. Mandell, "Delamination at thick ply drops in carbon and glass fiber laminates under fatigue loading," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 130, no. 3, p. 031001, 2008.
- [21] K. Tohgo, S. Nakagawa, and K. Kageyama, "Fatigue behavior of CFRP cross-ply laminates under on-axis and off-axis cyclic loading," *International journal of fatigue*, vol. 28, no. 10, pp. 1254-1262, 2006.
- [22] M. Kawai and N. Honda, "Off-axis fatigue behavior of a carbon/epoxy cross-ply laminate and predictions considering inelasticity and in situ strength of embedded plies," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, no. 10, pp. 1743-1755, 2008.
- [23] M. Kawai and N. Maki, "Fatigue strengths of cross-ply CFRP laminates at room and high temperatures and its phenomenological modeling," *International journal of fatigue*, vol. 28, no. 10, pp. 1297-1306, 2006.
- [24] H. Kumazawa, T. Aoki, and I. Susuki, "Influence of stacking sequence on leakage characteristics through CFRP composite laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 13, pp. 2107-2115, 2006.
- [25] V. T. Bechel, M. B. Fredin, S. L. Donaldson, R. Y. Kim, and J. D. Camping, "Effect of stacking sequence on micro-cracking in a cryogenically cycled carbon/bismaleimide composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 7, pp. 663-672, 2003.
- [26] M. Will, T. Franz, and G. Nurick, "The effect of laminate stacking sequence of CFRP filament wound tubes subjected to projectile impact," *Composite structures*, vol. 58, no. 2, pp. 259-270, 2002.
- [27] V. Kazymyrovych, *Very high cycle fatigue of engineering materials: A literature review*. Karlstad University, 2009.
- [28] 林榮貴, "The study and analysis of failure cause for large wind turbine in Taiwan," *機械月刊*, pp. 62-72, 2011.
- [29] O. Konur and F. Matthews, "Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of composites: a review," *Composites*, vol. 20, no. 4, pp. 317-328, 1989.
- [30] A. T. Echtermeyer, B. Engh, and L. Buene, "Lifetime and Young's modulus changes of glass/phenolic and glass/polyester composites under fatigue," *Composites*, vol. 26, no. 1, pp. 10-16, 1995.
- [31] G. Shih and L. Ebert, "The effect of the fiber/matrix interface on the flexural fatigue performance of unidirectional fiberglass composites," *Composites Science and Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 137-161, 1987.
- [32] S. Shiri, M. Pourgol-Mohammad, and M. Yazdani, "Prediction of Remaining Fatigue Cycles in Composite Materials Under Uncertainty," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 011001, 2016.
- [33] J. Degrieck and W. Van Paepegem, "Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials," *Applied mechanics reviews*, vol. 54, no. 4, pp. 279-300, 2001.
- [34] R. Sarfaraz, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "A hybrid S-N formulation for fatigue life modeling of composite materials and structures," *Composites Part A:*

- Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 3, pp. 445-453, 2012.
- [35] S. Shiri, M. Yazdani, and M. Pourgol-Mohammad, "A fatigue damage accumulation model based on stiffness degradation of composite materials," *Materials & Design*, vol. 88, pp. 1290-1295, 2015.
- [36] T. Peng, Y. Liu, A. Saxena, and K. Goebel, "In-situ fatigue life prognosis for composite laminates based on stiffness degradation," *Composite Structures*, vol. 132, pp. 155-165, 2015.
- [37] M. M. Shokrieh and L. B. Lessard, "Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: Modeling," *Journal of Composite Materials*, vol. 34, no. 13, pp. 1056-1080, 2000.
- [38] S. B. Clay and P. M. Knoth, "Experimental results of fatigue testing for calibration and validation of composite progressive damage analysis methods," *Journal of Composite Materials*, p. 0021998316670132, 2016.
- [39] N. R. Council, "Assessment of research needs for wind turbine rotor materials technology." *National Academies Press*, 1991.
- [40] D. N. Veritas, "Fatigue design of offshore steel structures," *No. DNV-RP-C203*, vol. 30, 2010.
- [41] L. Struik, "Physical aging in plastics and other glassy materials," *Polymer Engineering & Science*, vol. 17, no. 3, pp. 165-173, 1977.
- [42] E. Gellert and D. Turley, "Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 11, pp. 1259-1265, 1999.
- [43] R. Maurin, Y. Perrot, A. Bourmaud, P. Davies, and C. Baley, "Seawater ageing of low styrene emission resins for marine composites: Mechanical behaviour and nano-indentation studies," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 8, pp. 1024-1032, 2009.
- [44] A. Boisseau, 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*, vol. 19, no. 3-4, pp. 459-473, 2012.
- [45] P. Davies, G. Germain, B. Gaurier, A. Boisseau, and D. Perreux, "Evaluation of the durability of composite tidal turbine blades," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 371, no. 1985, p. 20120187, 2013.
- [46] A. Boisseau, P. Davies, and F. Thiebaud, "Fatigue behaviour of glass fibre reinforced composites for ocean energy conversion systems," *Applied Composite Materials*, pp. 1-11, 2013.
- [47] P. S. Rao and M. M. Husain, "Prediction analysis on mechanical properties of hygrothermal ageing GFRP composite laminates," 2016.
- [48] Y. Hu, X. Li, A. W. Lang, Y. Zhang, and S. R. Nutt, "Water immersion aging of polydicyclopentadiene resin and glass fiber composites," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 124, pp. 35-42, 2016.
- [49] C. Kennedy, S. Leen, and C. Ó. Brádaigh, "Immersed fatigue performance of glass fibre-reinforced composites for tidal turbine blade applications," *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, vol. 2, no. 2, p. 12, 2016.
- [50] R. R. Fuczak, "The Effects of Fatigue Loading Frequency on Fatigue Life of High-strength Pressure Vessel Steels," *Army Armament Research Devel Orent and Eengineering Center Watervliet Ny Benet Labs*, 1994.
- [51] S. F. Shuler, J. W. Holmes, X. Wu, and D. Roach, "Influence of Loading Frequency on the Room-Temperature Fatigue of a Carbon-Fiber/SiC-Matrix Composite," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 76, no. 9, pp. 2327-2336, 1993.

- 
- [52] J. W. Holmes, X. Wu, and B. F. Sørensen, "Frequency Dependence of Fatigue Life and Internal Heating of a Fiber-Reinforced/Ceramic-Matrix Composite," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 77, no. 12, pp. 3284-3286, 1994.
- [53] J. M. Staehler, S. Mall, and L. P. Zawada, "Frequency dependence of high-cycle fatigue behavior of CVI C/SiC at room temperature," *Composites science and technology*, vol. 63, no. 15, pp. 2121-2131, 2003.
- [54] M. Ruggles-Wrenn, D. Christensen, A. Chamberlain, J. Lane, and T. Cook, "Effect of frequency and environment on fatigue behavior of a CVI SiC/SiC ceramic matrix composite at 1200 C," *Composites Science and Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 190-196, 2011.
- [55] W. HWANG and K. HAN, "Fatigue of Composites— Fatigue Modulus," *Journal of Composite Materials*, vol. 20, 1986.
- [56] P. Purnell, J. Cain, P. Van Itterbeeck, and J. Lesko, "Service life modelling of fibre composites: A unified approach," *Composites science and technology*, vol. 68, no. 15, pp. 3330-3336, 2008.
- [57] H. Kotik and J. P. Ipiña, "Frequency effect in short-beam shear fatigue of a glass fiber reinforced polyester composite," *International Journal of Fatigue*, vol. 90, pp. 116-124, 2016.