

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

探討二氧化矽在玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材
料上對於機械性質所造成的影響



Investigating SiO₂ nanoparticle effect on the mechanical
behaviors of glass/epoxy composites

研究生：鄭伊烈

指導教授：蔡佳霖 博士

中華民國九十七年六月

探討二氧化矽在玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料上對於機
械性質所造成的影響

Investigating SiO₂ nanoparticle effect on the mechanical
behaviors of glass/epoxy composites

研究生：鄭伊烈

Student : Yi-Lieh Cheng

指導教授：蔡佳霖

Advisor : Jia-Lin Tsai

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Mechanical Engineering

June 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

摘要

本研究主要探討奈米級二氧化矽與橡膠在玻璃纖維/環氧樹脂中對於機械性質所造成之影響。探討奈米級二氧化矽對於剪應力、靜態/動態壓縮強度之影響，以及利用積層間破壞韌性探討橡膠所造成之影響。藉由溶膠-凝膠技術將粒徑為 25 奈米之二氧化矽均勻分散於環氧樹脂當中，利用手工積層方式將二氧化矽之基材均勻塗佈於等向性之玻璃纖維布上並佐以真空成形，製成玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料平板。



利用纖維偏軸 10° 以進行剪應力拉伸實驗以及纖維偏軸 0° 、 5° 、 10° 、 15° 及 90° 進行靜態/動態壓縮實驗，油壓式萬能拉伸實驗機(MTS)負責靜態(Quasi-Static)方面的壓縮測試，另外霍普金森桿(SHPB)則在動態(Dynamic)壓縮實驗上作量測。由結果發現添加奈米級二氧化矽於複合材料後其剪應力及壓縮強度皆有達到增益效果，並由電子顯微鏡(SEM)拍攝之圖片得知，添加二氧化矽有助於增強纖維與基材之間的附著力而使機械性質提升。

利用模態一破壞韌性分別探討添加二氧化矽及橡膠對於複合材料之破壞韌性所造成之影響。其中橡膠 CTBN 和 CSR 將於本節中進行討論，由實驗結果得知添加橡膠 CSR 後其破壞韌性提升比例最明

顯，進一步添加二氧化矽於橡膠 CSR 後卻造成破壞韌性下降。然而添加橡膠 CTBN 後其破壞韌性提升比例較低，接著將二氧化矽混合於橡膠 CTBN 後對於破壞韌性有提升效果。無論此組合是否採用，添加奈米級二氧化矽與橡膠之混合方式有助於提升複合材料之破壞韌性，並且不影響複合材料之剛性。



Abstract

The research is aimed to investigate the effect of silica nanoparticles and rubber particles on the glass fiber/epoxy nanocomposites. For the silica nanoparticles, we are focusing on their influence in in-plane shear strength, compression strength. On the other hand, for the rubber particles, the interlaminar fracture toughness is mainly of concern. Through a sol-gel technique, the silica particles with a diameter of 25 nm were exfoliated uniformly into the epoxy resin. The corresponding glass/epoxy nanocomposites were prepared by impregnating the silica epoxy mixture into the dry glass fiber through a vacuum hand lay-up process.

The in-plane shear strength was determined from the off-axis 10 degree specimens and the quasi-static and dynamic compressive strengths of glass fiber composite with fiber orientations of 0°, 5°, 10°, 15° and 90° were evaluated from hydraulic MTS machine and Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) respectively. Results indicated that the fiber composites with silica modified epoxy matrix illustrate superior in-plane strength and compressive strength than those without including any silica nanoparticles. Moreover, from SEM micrographics, it was revealed that the enhancement can be attributed the improved interfacial bonding caused by the silica nanoparticles.

The dependence of interlaminar fracture toughness of the fiber composites on silica nanoparticle and rubber particles was investigated from double cantilever beam specimens. Both CTBN and CSR rubber

particles were considered in the study. Experimental results indicated that the samples with only CSR rubber particles exhibit the highest fracture toughness than other cases. In such case, the contribution of silica nanoparticle demonstrates the diminishing effect on the fracture toughness. However, for the fiber composites with CTBN particles, although their fracture toughness is a little lower, the influence of the silica nanoparticle on the fracture toughness is positive. No matter which ingredients were adopted, the combination of the silica nanoparticles and rubber particle can significantly improve the fracture toughness of the fiber composites without sacrificing their stiffness.



誌 謝

在此論文定稿之際，首先感謝指導教授 蔡佳霖博士兩年來的悉心指導與栽培，使得學生論文順利完成，在此致上由衷的謝意。同時感謝清華大學動機系葉孟考教授、交通大學機械系金大仁教授、工業技術研究院材化所劉時州博士撥冗擔任學生口試委員，給予學生指教與指正。此外，感謝學長曾世華、吳明道、陳崇文、陳奎翰、郭濬清、黃仁傑、王漢偉給予研究與學業上的幫助，加上學弟林奕安、張體綱、黃琮鍾一年的陪伴，讓伊烈的研究所生涯增色許多，也祝福你們論文順利。



此外感謝二十多年來父母親，鄭秋榮先生與黃淑燕女士，給予無限關懷與鼓勵，也感謝姐姐雅綺的支持，使得伊烈在求學過程中，無後顧之憂下完成碩士學位。

最後感謝雅婷，陪伴我走過研究所的時光，帶給我無限歡笑、信心與支持，總是在最難熬的時刻給予無限的關心與鼓勵，也祝福妳在工作上一切順利、賺大錢。

感謝一路走來，在我身旁所有的人，謝謝你們。

目錄

| | | |
|----------|---------------------------|------|
| 摘要 | | i |
| ABSTRACT | | iii |
| 誌謝 | | v |
| 目錄 | | vi |
| 圖表目錄 | | viii |
| 第一章 | 緒言..... | 1 |
| 1.1 | 研究背景與文獻回顧..... | 1 |
| 1.2 | 研究目標..... | 8 |
| 第二章 | 奈米複合材料製作流程..... | 9 |
| 2.1 | 環氧樹脂/硬化劑..... | 10 |
| 2.2 | 二氧化矽奈米複合材料之製作流程..... | 10 |
| 2.3 | CTBN/二氧化矽之製作流程..... | 11 |
| 2.4 | ATBN/二氧化矽之製作流程..... | 12 |
| 2.5 | CSR/二氧化矽之製作流程..... | 13 |
| 2.6 | 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之製作流程..... | 13 |
| 第三章 | 單方向複合材料板材之機械行為..... | 15 |
| 3.1 | 剪應力拉伸實驗..... | 15 |
| 3.2 | 壓縮實驗..... | 18 |

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| 3.2.1 | 動態(Dynamic)壓縮實驗····· | 18 |
| 3.2.2 | 靜態(Quasi-static)壓縮實驗····· | 22 |
| 第四章 | 積層間破壞韌性實驗····· | 25 |
| 4.1 | 二氧化矽複合材料板材(延性硬化劑)破壞韌性實驗····· | 27 |
| 4.2 | 二氧化矽複合材料板材(脆性硬化劑)破壞韌性實驗····· | 28 |
| 4.2.1 | 橡膠複合材料板材(脆性硬化劑)破壞韌性實驗····· | 28 |
| 4.2.2 | 雙重顆粒(Hybrid)複合材料板材破壞韌性實驗····· | 29 |
| 4.3 | 生物型掃描式電子顯微鏡(Bio-SEM)····· | 30 |
| 4.3.1 | 探討二氧化矽於複合材料板材(延性)之附著力····· | 30 |
| 4.3.2 | 探討橡膠及二氧化矽於複合材料板材(脆性)之附著力····· | 31 |
| 第五章 | 結論····· | 34 |
| 參考文獻 | ····· | 36 |

圖表目錄

| | | |
|--------|--|----|
| 表 2-1 | 環氧樹脂/硬化劑以及添加不同含量之補強材····· | 39 |
| 表 3-1 | 5 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與二氧化矽含量及硬化過程壓力對照表····· | 40 |
| 表 3-2 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受力方向與纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸破壞強度與二氧化矽含量對照表····· | 40 |
| 表 3-3 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受力方向與纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸破壞強度平均值和強度增加比例與二氧化矽含量對照表····· | 41 |
| 表 3-4 | 22 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與二氧化矽含量及硬化過程壓力對照表····· | 42 |
| 表 3-5 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率····· | 43 |
| 表 3-6 | 添加二氧化矽含量 10wt% 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率····· | 44 |
| 表 3-7 | 添加二氧化矽含量 20wt% 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率····· | 45 |
| 表 3-8 | 添加二氧化矽含量 30wt% 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率····· | 46 |
| 表 3-9 | 0° 之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率····· | 47 |
| 表 3-10 | 5° 之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率····· | 47 |

| | | |
|--------|--|----|
| 表 3-11 | 10°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率····· | 47 |
| 表 3-12 | 15°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率····· | 48 |
| 表 3-13 | 90°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率····· | 48 |
| 表 3-14 | 動態測試中不同纖維角度所設定的參數····· | 49 |
| 表 3-15 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度····· | 50 |
| 表 3-16 | 添加二氧化矽含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度 | 51 |
| 表 3-17 | 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度 | 52 |
| 表 3-18 | 添加二氧化矽含量 30wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度 | 53 |
| 表 4-1 | 12層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板(D-230)之規格大小與添加二氧化矽之硬化過程壓力對照表····· | 54 |
| 表 4-2 | 添加二氧化矽及橡膠之 12層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板(H-100)規格大小與硬化過程壓力對照表····· | 54 |
| 表 4-3 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂(硬化劑 D-230)奈米複合材料在積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋放率與二氧化矽含量對照表····· | 55 |
| 表 4-4 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(D-230)在積層間破壞韌性試驗之平均臨界能量釋放率與強度增加比例····· | 55 |
| 表 4-5 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂(硬化劑 H-100)奈米複合材料在積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋放率於不 | |

| | | |
|-------|---|----|
| | 同添加二氧化矽含量及橡膠含量對照表····· | 56 |
| 表 4-6 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料 (H-100)在積層間破壞韌性試驗之平均臨界能量釋放率與強度增加比例於不同添加二氧化矽含量和橡膠含量比較表·· | 57 |
| 圖 2.1 | 選用硬化劑為 D-230 時，玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之硬化過程····· | 58 |
| 圖 2.2 | 選用硬化劑為 H-100 時，玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之硬化過程····· | 58 |
| 圖 3.1 | 等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之外型示意圖····· | 59 |
| 圖 3.2 | 拉伸試驗之試片規格····· | 59 |
| 圖 3.3 | E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_s$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線(包含未添加二氧化矽及分別添加二氧化矽含量比重 5%；10%；20%)····· | 60 |
| 圖 3.4 | 根據不同二氧化矽含量相對於拉伸試驗之奈米複合材料 $[10]_s$ 拉伸強度柱狀圖····· | 60 |
| 圖 3.5 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受力方向與纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為二氧化矽含量比重為 0%；5%；10%；20%) | 61 |
| 圖 3.6 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10° 方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 61 |
| 圖 3.7 | 添加比重為 20% 二氧化矽含量之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10° 方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 62 |
| 圖 3.8 | 霍普金森桿(SHPB)架構····· | 62 |

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 3.9 | 萬能材料試驗機(MTS)..... | 63 |
| 圖 3.10 | 等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之外型示意圖..... | 63 |
| 圖 3.11 | 壓縮實驗之試片規格..... | 64 |
| 圖 3.12 | 霍普金森桿(SHPB)示意圖..... | 64 |
| 圖 3.13 | 霍普金森桿(SHPB)的量測圖..... | 65 |
| 圖 3.14 | 將 SHPB 測試結果平均化並且比較未添加與添加二氧化矽含量 10%、20%、30%在各角度之破壞強度柱狀圖..... | 65 |
| 圖 3.15 | 添加二氧化矽含量 20%之纖維方向 5°試片受衝擊後記錄於示波器顯示之圖形..... | 66 |
| 圖 3.16 | 時間平移將入射波和反射波及傳遞波移至同一時間觸發..... | 66 |
| 圖 3.17 | 被動桿和傳遞桿之力平衡的圖形..... | 67 |
| 圖 3.18 | 添加二氧化矽含量 20%在纖維方向 5°之時間對應力之曲線圖..... | 67 |
| 圖 3.19 | 添加二氧化矽含量 20%在纖維方向 5°之時間對應變之曲線圖..... | 68 |
| 圖 3.20 | 萬能材料試驗機(MTS)壓縮測試示意圖..... | 68 |
| 圖 3.21 | 萬能材料試驗機(MTS)壓縮實驗架構..... | 69 |
| 圖 3.22 | 根據不同角度比較未添加和添加二氧化矽含量 10%、20%、30%之壓縮破壞強度之柱狀圖..... | 69 |
| 圖 3.23 | 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 0°破壞試片之破壞機制是屬於微挫屈..... | 70 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 3.24 | 添加二氧化矽含量 30%之 0°之破壞試片····· | 70 |
| 圖 3.25 | 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 5°破壞試片之破壞機制是屬於微挫屈····· | 71 |
| 圖 3.26 | 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 10°破壞試片之破壞機制是屬於微挫屈····· | 71 |
| 圖 3.27 | 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 15°破壞試片之破壞機制是屬於微挫屈····· | 72 |
| 圖 3.28 | 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 90°破壞試片之破壞機制是屬於出平面剪應力破壞····· | 72 |
| 圖 3.29 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 73 |
| 圖 3.30 | 添加二氧化矽含量 30%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 73 |
| 圖 4.1 | 12 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之示意圖····· | 74 |
| 圖 4.2 | 雙懸臂梁(DCB)試片規格圖····· | 74 |
| 圖 4.3 | 雙懸臂梁(DCB)實驗圖····· | 75 |
| 圖 4.4 | 電腦伺服控制材料試驗機····· | 75 |
| 圖 4.5 | 積層間破壞韌性試驗中施力與位移曲線循環圖····· | 76 |
| 圖 4.6 | 修正缺陷長度之推導圖····· | 76 |
| 圖 4.7 | 同一試片進行五次以上的積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋放率····· | 77 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 4.8 | 根據添加不同二氧化矽含量及選用延性硬化劑(D-230)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖····· | 77 |
| 圖 4.9 | 根據添加不同二氧化矽含量及選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖····· | 78 |
| 圖 4.10 | 添加不同橡膠在相同含量下並且選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖····· | 78 |
| 圖 4.11 | 添加雙重顆粒(Hybrid)在相同含量下並且選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖····· | 79 |
| 圖 4.12 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(D-230)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測破壞情形····· | 79 |
| 圖 4.13 | 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(D-230)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測破壞情形····· | 80 |
| 圖 4.14 | 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 80 |
| 圖 4.15 | 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形····· | 81 |
| 圖 4.16 | 添加 CTBN 含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形····· | 81 |
| 圖 4.17 | 添加雙重顆粒含量 10wt% CTBN+10wt% Silica 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形····· | 82 |
| 圖 4.18 | 添加 CSR 含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形····· | 82 |

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 4.19 | 添加雙重顆粒含量 10wt% CSR+10wt% Silica 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形..... | 83 |
| 圖 4.20 | 添加二氧化矽於延性/脆性基材及玻璃纖維/環氧樹脂奈米複 合材料中對於破壞韌性之影響..... | 83 |



第一章 緒言

1.1 研究背景與文獻回顧

近年來複合材料已經由軍事及航太科技發展到各個不同領域上，因此複合材料已經成為不可獲缺的領域，複合材料主要是由補強材(Reinforcement)與基材(Matrix)所組成，其中補強材主要分為玻璃纖維(Glass fiber)與碳纖維(Carbon fiber)，而基材部分主要分為熱塑性(Thermoplastic)與熱固性(Thermosetting)兩大部分，然而經由纖維與基材混合來增加其機械性質已經達到有限的提升，為了更進一步的提升性質，添加粉體的方式來改善基材與纖維之間的強度，使得在環氧樹脂中添加粉體已經成為複合材料界中為一研究之走向。

Qiu 等人[1]利用真空佐以樹脂轉注法(VARTM)的製作方法添加改質與未改質之多壁奈米碳管於玻璃纖維/樹脂複合材料，並且測試纖維方向與側向的機械性質，經由測試結果發現當添加未改質之奈米碳管雖然其材料模數 E_1 與材料模數 E_2 皆有上升，但其破壞強度卻沒有明顯提升，主要是由於未改質的奈米碳管本身與樹脂無法有良好的鍵結，但是將經過改質之奈米碳管添加於玻璃纖維/樹脂複合材料之後其機械性質皆有所提升，主要是由於經過改質之碳管與玻璃纖維會有良好的鍵結，所以可以使機械性質有效提升。Bekyarova 等人[2]

探討未添加奈米碳管之碳纖維/樹脂複合材料與添加多壁之奈米碳管於碳纖維/樹脂複合材料之機械性質，利用電泳法將奈米碳管附著於碳纖維表面，再利用真空佐以樹脂轉注法(VARTM)的製作方法將樹脂滲入於碳纖維，並且測試材料模數與剪應力，雖然使材料模數有明顯提升，但是在剪應力之強度卻沒有明顯的提升，這個結果和[1]未改質之奈米碳管的測試結果相似。

Zheng 等人[3]添加奈米級二氧化矽於玻璃纖維/環氧樹脂，並且探討添加不同含量之二氧化矽，經由拉伸實驗和壓縮實驗以及剪力實驗探討其機械性質，並且可以由結果發現隨著二氧化矽添加量之增加其強度也隨著上升，當添加量達到 7wt%時拉伸強度上升了 24%，這結果顯示出添加二氧化矽的確可以使強度提升，但是當添加 5wt%含量時拉伸應力雖然有明顯提升，但是卻造成剪應力下降，經由分析結果判斷出有可能是二氧化矽之添加量已經超過飽和，而使得剪力強度得到反效果的現象。

Kinloch 等人[4]經由添加雙粉體的方式增加其機械性質，並且進行第一模式破壞韌性試驗，當添加奈米級二氧化矽含量 11.1wt%時，其破壞韌性提升 100%；添加微米級橡膠(Hycar CTBN 1300x8)含量 9wt%，其破壞韌性提升 88%；最後經由添加奈米級二氧化矽含量 10.5wt%與微米級橡膠 9wt%的方式進行破壞韌性測試，其破壞韌性

提升 237%，Kinloch 等人[5]和[4]添加相同類型的粉體，並且將基材經由真空佐以樹脂轉注法(VARTM)的製作方法滲入於碳纖維中，進行揚氏模數及第一模態破壞韌性試驗(Mode I fracture Toughness Test, G_{IC})，探討添加於碳纖維後之機械性質，當添加奈米級二氧化矽含量 11.9wt%於碳纖維時，其積層間破壞韌性提升了 11%；接著添加微米級橡膠(Hycar CTBN 1300x8)9wt%含量於碳纖維後，其積層間破壞韌性提升 139%；最後經由添加奈米級二氧化矽含量 10.5wt%與微米級橡膠 9wt%的方式進行破壞韌性測試，其積層間破壞韌性提升 200%，這種添加雙粉體的作法不但可以改善因添加橡膠造成基材變韌的現象，更可以提升其破壞韌性獲得雙重效果。

Kinloch 等人[6]針對奈米級二氧化矽及微米級橡膠於基材和玻璃纖維中，進行破壞韌性實驗和熱性質測試，對於破壞韌性皆有所提升並且不會影響玻璃轉移溫度(T_g)，由破壞韌性結果可以發現添加二氧化矽或橡膠時其韌性皆有所提升，當添加雙重顆粒(Hybrid)時，基材之破壞韌性提升 1000%遠高於添加於玻璃纖維中之提升比例 160%，其原因為纖維限制了基材的塑性變形區，而使破壞韌性之提升受到影響。

Siddiqui 等人[7]探討添加有機黏土在碳纖維/環氧樹脂複合材料的影響，利用緊湊拉伸試驗(Compact tension test, CT)及第一模態破壞

韌性試驗(Mode I fracture Toughness Test, G_{IC})探討其機械性質，並且利用穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)觀察有機黏土在碳纖維/環氧樹脂複合材料上的分散情形，並且添加不同有機黏土含量，在緊湊拉伸試驗中，當有機黏土添加量為 7wt%時其基材之破壞韌性提升了 60%，主要的原因是有機黏土有效的阻礙了缺陷之成長；將有機黏土含量 7wt%添加於碳纖維並進行破壞韌性試驗，可以發現其積層間破壞韌性提升 50%，並且透過掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察試片之側面裂縫，可以發現隨著有機黏土含量增加時，其基材與碳纖維的附著力越強，使得缺陷成長由原本的基材與碳纖維之介面轉為基材間的破壞，並且可以由 [4]、[5]、[6]及[7]的結果發現，在[4]、[5]及[6]中添加相同含量之二氧化矽其破壞韌性於基材時比添加於纖維之破壞韌性明顯的提升許多，而[7]添加有機黏土於基材與添加於碳纖維之破壞韌性上升之比例是相近的。

Sprenger 等人[8]研究出使材料之機械性質更好及低價位的方式，經由添加奈米級二氧化矽粉體雖然可以使強度上升，但也造成材料變的更脆性，為了彌補這一個缺點，經由添加微米級橡膠(CTBN)並且經由第一模態破壞韌性試驗(Mode I fracture Toughness Test, G_{IC})，經由真空佐以樹脂轉注法(VARTM)的製作方法將環氧樹脂含浸

於碳纖維，經由測試結果發現添加 11.2wt%之二氧化矽其基材之破壞韌性提升了 270%當添加 12%wt之二氧化矽於玻璃纖維時其積層間破壞韌性提升了 36%，並且可以由結果發現經由添加雙粉體的方式可以增強其機械性質，其結果和[4]及[5]的趨勢雷同。

Cho 等人[9]利用超音波震盪器將奈米級碳板混於碳纖維/環氧樹脂中，並且利用拉伸實驗及壓縮實驗測試添加奈米粉體對機械性質的影響，拉伸實驗為測試纖維偏軸 10 度之剪應力，當奈米碳板添加量達到 5wt%時其剪應力提升 11%，接著再經由壓縮實驗探討纖維偏軸 4 度之壓縮應力，經由結果發現添加奈米碳板添加量達到 5wt%時其強度提升 16%，可以發現在拉伸試驗以及壓縮試驗中其強度隨著添加量的上升強度也隨之提升，其主要的原因是經添加奈米碳板後使基材與纖維之間的附著力變的更強，所以強度也隨著提升。

Guo 等人[10]探討添加不同含量之奈米級二氧化矽於環氧樹脂，經由靜態壓縮實驗與動態壓縮實驗測試不同應變率之壓縮應力，由結果發現不同之應變率及奈米粉體之分散性皆會影響其機械性質，並且可以發現添加奈米粉體於高應變率測試之破壞應力明顯比未添加粉體之破壞應力提升許多，但是在低應變率測試時卻沒有明顯的提升。

Becker 等人[11]探討添加奈米級二氧化矽於碳纖維/環氧樹脂對於破壞韌性的影響，經由添加不同二氧化矽含量 2.5wt%、5wt%、

7wt%，利用第一模態破壞韌性試驗(Mode I fracture Toughness Test, G_{IC})進行測試，由結果發現添加二氧化矽後其破壞韌性皆有提升，其中含量為 5wt%時提升比例達 88%，主要因為添加二氧化矽增強纖維與基材之間的附著力以及基材產生塑性變形抑制裂紋的延伸。

Yan 等人[12]探討添加液態橡膠(CTBN)及雙球殼橡膠(Core shell rubber, CSR)於碳纖維中，利用緊湊拉伸試驗(Compact tension test, CT)及第一模態破壞韌性試驗(Mode I fracture Toughness Test, G_{IC})探討其機械性質，當添加 CSR 含量 15wt%時，基材之破壞韌性提升約 1800%，在添加相同比例於碳纖維中其破壞韌性僅提升 50%遠低於基材的提升比例，其原因歸咎於基材之周圍的纖維而影響塑性變形的範圍，並由掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察其破壞面，在添加橡膠 CTBN 時，其破壞面由塑性剪力變形產生撕裂的條紋，而添加橡膠 CSR 時，破壞面變得非常粗糙(Rough)並有許多空穴(Cavitation)的產生，而這些現象皆有助於抑制裂紋的延伸。

Walter 等人[13]探討在基材與纖維中破壞韌性提升比例之影響，其中添加於纖維中其破壞韌性提升比例會遠低於基材之提升比例，主要受限於基材周邊的纖維，而使塑性變形區域受到限制，並用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察延性(Ductile)與脆性基材(Brittle)於碳纖維中之破壞情形，當使用延性基材於纖維中其裂紋延伸於基材中，而脆性基

材於纖維中其裂紋延伸於纖維與基材之界面上。

Jang 等人[14]分別添加微米級橡膠 CTBN 與 ATBN 於碳纖維中進行破壞韌性及層間剪力(Interlaminar shear strength, ILSS)的測試，添加 CTBN 含量 10%其破壞韌性提升 5%，而添加相同含量之 ATBN 其破壞韌性提升 50%，在層間剪力試驗中添加 CTBN 含量 10 wt %時卻下降 38%，而添加相同含量之 ATBN 提升 20%，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試片之破壞機制，發現添加 ATBN 後基材表面的粗糙度以及基材與纖維之間的附著力，皆比添加 CTBN 時來的明顯。Sun 等人[15]探討添加雙球殼橡膠(CSR)及有機黏土(Clay)進行破壞韌性測試，由結果發添加雙球殼橡膠含量 5wt%時破壞韌性提升 77%，而使用雙重顆粒(Hybrid)僅提升 25%，利用掃描式電子顯微鏡觀察破壞面，在雙球殼橡膠中產生的空穴(Cavitation)最為密集，然而空穴有效抑制裂紋延伸而使破壞韌性達到增益的效果，並且由原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)得知在添加雙球殼橡膠之破壞面其粗糙度最為明顯。

Johnsen 等人[16]探討添加奈米級二氧化矽對於破壞韌性的影響，添加二氧化矽不影響玻璃轉移溫度(Tg)，但在揚氏模數及破壞韌性上卻呈現大幅度增益效果，當二氧化矽含量為 13.4vol%其破壞韌性提升 360%，由掃描式電子顯微鏡(SEM)及原子力顯微鏡(AFM)觀察其

破壞機制，其破壞機制為基材塑性變形(Plastic deformation)、裂紋抑制(Crack pinning)、裂紋偏折(Crack deflection)。

1.2 研究目標

本研究目的為探討奈米級粉體二氧化矽(Nano-silica)在玻璃纖維/環氧樹脂複合材料對機械性質所造成之影響，並且利用拉伸實驗在纖維方向 10° 的同向性試片當中，根據添加不同含量的二氧化矽來求得材料強度，最後經由掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察其破壞面，並且由破壞機制與實驗結果做進一步的探討，接著利用靜態(Quasi-static)與動態(Dynamic)壓縮實驗進一步測試添加不同二氧化矽含量在纖維方向 0° 、 5° 、 10° 、 15° 及 90° 的同向性試片當中之抗壓強度的表現，最後添加奈米級粉體二氧化矽、橡膠(Rubber)及雙重顆粒(Hybrid)於脆性與延性硬化劑，並利用積層間破壞韌性實驗探討層與層之間的破壞情形，以求得試片之能量釋放率。

第二章 奈米複合材料製作流程

本研究主要探討添加奈米級二氧化矽(Nano-Silica)在玻璃纖維中對於機械性質所造成的影響，此玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料具備了以下基本原料，樹脂選用常見的雙酚醛類樹脂(Diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA)。硬化劑分別選用D-230與H-100，其中D-230為聚醚胺硬化劑(polyoxypropylenedamine)屬於延性基材，而H-100為改質環狀脂肪胺硬化劑(Modify cycloaliphatic amine)屬於脆性基材。補強材方面添加奈米級顆粒二氧化矽(SiO_2)來增加材料的強度，並且添加端羧基丁腈橡膠 (Carboxyl terminated butadiene-acrylonitrile copolymer, CTBN)、端胺基丁腈橡膠 (Amine terminated butadiene-acrylonitrile copolymer, ATBN)以及核殼型橡膠(Core shell rubber, CSR)來增強材料的韌性，其添加含量如表2-1所示。

當添加硬化劑為D-230後，試片分別進行剪應力實驗、靜/動態壓縮實驗及積層間破壞韌性實驗，然而硬化劑D-230是屬於延性基材，使得在積層間破壞韌性實驗所得到之結果其現象確是不明顯的，由參考文獻[5]發現作者選用屬於脆性基材之硬化劑進行積層間破壞韌性測試，為了驗證文獻的現象選用屬於脆性基材之硬化劑H-100來進行積層間破壞韌性測試。

2.1 環氧樹脂/硬化劑

樹脂選用的是由鴻連公司所提供，其型號為 C-1532，環氧當量為 187。硬化劑選用由 Huntsman Corp. 所生產 JEFFAMINE D-230，其活性氫當量為 60，以及由允德實業股份有限公司(YUN TEH INDUSTRIAL CO., LTD.)所生產之硬化劑型號為 H-100 (Modify cycloaliphatic amine)，其活性氫當量為 45。

2.2 二氧化矽奈米複合材料之製作流程

選取其樹脂內已含 40wt%之二氧化矽的合成樹脂(Nanopox@F400, 由 Hanse Chemie AG, Germany 所提供)，其二氧化矽顆粒粒徑大約為 20nm，其環氧當量為 295。經過與純樹脂稀釋至所需的含量，並且用機械攪拌器在常溫下以每分鐘 200 轉速度初步的攪拌混合物 10 分鐘，由於機械式攪拌器所引起的剪切力不足以將二氧化矽均勻分散於樹脂中，連帶使機械性質受到影響，因此指向式超音波震盪器在此扮演分散粒子的重要角色。指向式超音波震盪器是將探頭置於混合溶液中，利用高功率的輸出裝置將原本聚集的二氧化矽使其有效的分散在樹脂中。本研究所使用的指向式超音波震盪器由 Misonix 公司所生產的 Sonicator 3000 以每秒 90 到 120 瓦特的輸出功率產生高頻震盪欲稀釋之二氧化矽之樹脂 10 分鐘，為了避免震盪所產生的高溫對樹脂產生化學性質的改變，在混合溶液燒杯外圍置入冰水以達冷卻效

果，由於在機械式攪拌與超音波震盪皆會產生無數之微小氣泡，容易在基材上形成氣孔而造成應力集中使機械性質減弱。因此除氣可以避免氣孔對機械性質影響的產生，將分散好的混合溶液放入真空烤箱中以常溫除氣 10 分鐘，過程中可以發現大量的氣泡從燒杯冒出並且快速的破滅，除氣後以化學計量的方式得出硬化劑之量於電子磅秤上且置入於混合溶液中，再以機械式攪拌於常溫下 10 分鐘，由於攪拌會再一次產生氣泡於溶液中，以至於必須再一次進行除氣的動作，製作完成的基材將用於製造玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料上，以備進行剪應力實驗、靜/動態壓縮實驗及積層間破壞韌性實驗。

2.3 CTBN/二氧化矽之製作流程

增加材料韌性之端羧基丁腈橡膠 (Carboxyl terminated butadiene-acrylonitrile copolymer, CTBN)，由 Emerald Performance Materials 公司提供型號為 Hycar 1300X8，其環氧當量為 3550。

首先將二氧化矽稀釋至所需的含量其步驟參照上述之二氧化矽材料製造過程，再將 CTBN 置入已含有二氧化矽之溶液並且以機械攪拌器在 80°下以每分鐘 300 轉攪拌 6 小時，將分散好的混合溶液放入真空烤箱中以 80°除氣 20 分鐘，過程中氣泡從燒杯冒出並且破滅，再將混合後之基材降至常溫並且將硬化劑置入，再一次使用機械攪拌

器在常溫下以每分鐘 200 轉速度攪拌 10 分鐘，由於添加 CTBN 後其基材硬化時間縮短，為了避免試片製作過程中基材提早硬化，所以在使用真空烤箱除氣時將除氣時間縮短為 5 分鐘，製作完成的基材將備用於製造玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料上來進行積層間破壞韌性實驗。

2.4 ATBN/二氧化矽之製作流程

增加材料韌性之端胺基丁腈橡膠 (Amine terminated butadiene-acrylonitrile copolymer, ATBN)，由 Emerald Performance Materials 公司提供型號為 Hycar 1300X16，其活性氫當量為 900。

ATBN 需與硬化劑先進行預聚反應，利用機械攪拌器在 60°下以每分鐘 300 轉速度攪拌 6 小時後，置入真空烤箱中以 60°除氣 20 分鐘，並且待溶液降至常溫。

另一方面將二氧化矽稀釋至所需的含量其步驟參照上述之二氧化矽材料製造過程，再將混有二氧化矽之基材與添加 ATBN 之硬化劑混合，利用機械攪拌器在常溫下以每分鐘 200 轉速度攪拌 10 分鐘後，置入真空烤箱中於常溫下除氣 10 分鐘，製作完成的基材將備用於製造玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料上來進行積層間破壞韌性實驗。

2.5 CSR/二氧化矽之製作流程

增加材料韌性之核殼型橡膠(Core shell rubber, CSR)，由 Rohm Hass 公司提供型號為 EXL-2314，由玻璃殼包圍內部的橡膠所構成之球體，其顆粒大小約為 500nm 之白色粉體。

首先計算出二氧化矽所需的含量以及計算出 CSR 所需之添加量，並且將以上兩種添加物以及環氧樹脂利用機械攪拌器在常溫下以每分鐘 200 轉速度初步的攪拌混合物 10 分鐘，接著參照[15]使用指向式超音波震盪器以每秒 90 到 120 瓦特的輸出功率產生高頻震盪 20 分鐘，再將混合液置入真空烤箱常溫下除氣 10 分鐘後，接著參考文獻[17]利用機械攪拌器並且加熱至 80°以每分鐘 300 轉速度攪拌 2 小時後，將混合液放置於真空烤箱中加熱至 100°除氣 2 小時，待混合液降至常溫後加入硬化劑，並且使用機械攪拌器於常溫下以每分鐘 200 轉速度攪拌 10 分鐘，最後再利用真空烤箱於常溫下除氣 10 分鐘，基材即製作完成，製作完成的基材將備用於製造玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料上來進行積層間破壞韌性實驗。

2.6 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之製作流程

手工積層(Hand lay-up)佐以真空袋封裝為本研究採用之玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料人工製作方法，選擇 E 系列單方向性玻璃

纖維布(E-LR 0908-14, 由 Vectorply 公司所提供)將依照各實驗所需裁切所需之大小。將製作完成的基材均勻淋布在玻璃纖維上, 並且利用塑膠滾筒滾壓的方式將基材含浸於玻璃纖維, 透過來回施力的方式以確定每一束纖維皆能將基材含浸於玻璃纖維, 重複步驟直到層數符合實驗所須為止, 手工積層完成後的成品表面依序鋪上離型布以及與堆疊層數相同數量之小棉布以吸附多餘排出的基材, 重複動作於成品另一面, 再將整體放置於鐵塊上並覆上真空袋, 使用高溫高黏度之矽膠條封裝並利用真空幫浦抽氣達到真空狀態, 目的是消除材料中的氣泡並且吸出多餘的基材, 再將整體放入熱壓機, 溫度隨著使用不同的硬化劑而有所差異, 當選用硬化劑為 D-230 時整個熱壓過程(圖 2.1)由常溫升至 100°後持溫 3 小時, 再將溫度升至 125°後持溫 3 小時使之硬化接著自然降至常溫; 使用型號 H-100 硬化劑時熱壓過程參考文獻 [18](圖 2.2)為 45°持溫 4 小時、65°持溫 30 分鐘、85°持溫 30 分鐘及 105°持溫 1 小時, 最後再將加熱器關掉使溫度自然冷卻至常溫即可以得到玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料板, 再經過鑽石切割機裁出實驗所使用的試片。

第三章 單方向複合材料板材之機械行為

二氧化矽在玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的界面特性除了可以經由纖維的方向和纖維的側向方向可以做比較之外，對於承受剪應力的探討可以由偏軸拉伸實驗來求得，利用受力方向與試片纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸實驗為本研究所採用的方法，並且利用靜態/動態測試添加奈米級二氧化矽對壓縮應力所造成的影響。

3.1 剪應力拉伸實驗

拉伸實驗試片由五層板材(圖 3.1)所構成，板材大小為 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，厚度大約都在 1.45mm 左右(表 3-1)，其中玻璃纖維所佔之體積比為 44.7% ，測試試片由鑽石切割機裁出所需大小，圖 3.2 中的測試試片的長度為 200mm 和寬度 15mm ，受測試片之有效長度為 120mm ，且纖維方向和受力方向呈 10° 偏軸。

玻璃纖維墊片將黏貼於試片的尾端兩側，主要用於可以使試片受力均勻，並且可以防止大型萬能拉伸試驗機的夾頭不會直接對試片夾持的部分因力量過大而破壞試片，而玻璃纖維墊片的角度剪裁必須依據測試的方向而有所改變，由 Sun 在 92 年時所發表的文獻[1]當中可以得知在複合材料中應力與應變的關係：

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \bar{S}_{11}\sigma_0 \\
\varepsilon_{yy} &= \bar{S}_{12}\sigma_0 \\
\gamma_{xy} &= \bar{S}_{16}\sigma_0
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

其中 $\sigma_0 = \sigma_{xx}$ 為拉伸方向的應力， ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 γ_{xy} 分別為拉伸方向、側向方向的應變與剪力應變， \bar{S}_{ij} 為一材料特性矩陣，經由推算後玻璃纖維墊片的角度需與 X 軸所承夾角為：

$$\cot \phi = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}}
\tag{3.2}$$

其中參照吳明道[2]在 2006 年發表之論文當中的 \bar{S}_{16} 為 0.33GPa^{-1} 推算出玻璃纖維墊片需製作的斜角角度約為 37.7 度。

假設 $[10]_5$ 複合材料板材在 x 方向施予一軸向均佈力 σ_x ，在與纖維方向呈 10° 偏移，其板材平面剪應力可以輕易獲得：

$$\tau_{12} = -\sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \sigma_x
\tag{3.3}$$

因此在偏軸 10° 的試片所受剪應力可寫成：

$$\sigma_{12} = -\sin 10 \cdot \cos 10 \cdot \sigma_x \quad (3.4)$$

整體試片受軸向之拉伸應力-時間曲線將表示在圖 3.3，數據則列於表 3-2，並統整數據平均並且比較未添加二氧化矽與添加二氧化矽時所增強的強度比例於表 3-3，再將數據繪製成不同二氧化矽含量之柱狀圖顯示於圖 3.4，在未添加二氧化矽時的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料之偏軸 10°強度為 24.3MPa，添加二氧化矽含量 5%後其偏軸 10°強度上升至 27.7MPa，而二氧化矽含量 10%時強度為 30.3MPa，最後添加二氧化矽含量 20%時強度為 29.8MPa，可以經由柱狀圖證明出二氧化矽的增加可以在界面的剪切方向有一定程度的加強。

並且可以經由試片的破壞情形於圖 3.5，試片的破裂面都位於纖維與纖維之間並延著纖維方向斷裂可以證明出在界面上的斷裂是試片遭受破壞的主要原因。

細部的試片觀察破壞情形可以利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀察於圖 3.6 與圖 3.7，並且由圖 3.6 中可以明顯的顯示出未添加二氧化矽的試片斷裂面上脫落的纖維都是十分的乾淨且光滑，顯示出沒有樹脂結塊附於纖維上面，證明主要的破壞機制應為纖維與樹脂之間的脫落所造成，然而在圖 3.7 中二氧化矽含量為 20%時，可以發現許多的樹脂黏附在纖維上，此時的破壞機制也包含了樹脂間的破壞，代表二

氧化矽的添加是可以增加樹脂與纖維之間的黏著性。

3.2 壓縮實驗

為了進一步了解添加二氧化矽在玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的機械性質表現，進一步分析材料受壓縮之情形，並將壓縮的實驗過程分成動態(Dynamic)和靜態(Quasi-static)兩部分：動態壓縮試驗使用霍普金森桿(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)(圖 3.8)測試；靜態試驗方面使用萬能材料試驗機(Material Test System, MTS)(圖 3.9)測試。

3.2.1 動態(Dynamic)壓縮實驗

22 層板材如圖 3.10 所示，其中玻璃纖維所佔體積比為 46%，試驗板材厚度分別為表 3-4 中，厚度約為 6mm 左右，測試試片的長度皆為 8mm 和寬度 6mm(圖 3.11)，然而表面平整光滑是壓縮試驗中非常關鍵的一個處理步驟，試片和測試儀器之表面皆需經過表面研磨拋光的處理確保接觸表面光滑平整，避免表面的阻力造成應力集中現象的產生而使數據不準確。

霍普金森桿主要用於高應變率的測試，使用之材料為高強度之鋼材(SKD-11)，並且將表面經過碳化處理，再將表面做拋光加工使表面保持平整光滑，最後經過較直處理，霍普金森桿主要由衝撞桿(strike

bar)、被衝撞桿(incident bar)、傳遞桿(transmission bar)、停止桿(throw-off bar)所組成(圖 3.12)，當衝撞桿中的子彈藉由高壓氮氣系統(gas system)撞擊被衝撞桿時，試片將會受到壓縮而造成整體長度的改變，為了測量材料的應變所以在被衝撞桿和傳遞桿的左右兩邊皆貼上精密型應變規，並且將應變規連接到惠斯通電橋(Wheatstone Bridge circuits)、訊號放大器(Signal conditioning amplifier, Vishay Micro-Measurement Model 2210B)、數位示波器(Digital oscilloscope, Tektronix TDS3014B)，所得到的數據經由 Excel 計算即可以求出機械材料特性，霍普金森桿的量測原理如下(圖 3.13)。

被衝撞桿的應變規到試片左邊之接觸面所需的時間是 Δt_{AB} ，而輸入波 $\varepsilon_i(t)$ 和反射波 $\varepsilon_r(t)$ 皆是經由輸入桿的應變規所紀錄：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_I(t - \Delta t_{AB}) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_I(t + \Delta t_{AB}) \quad (3.6)$$

傳遞桿的應變規到試片右邊之接觸面所需的時間是 Δt_{CD} ，而穿透波 $\varepsilon_t(t)$ 是經由傳遞桿的應變規所紀錄，

$$\varepsilon_t = \varepsilon_T(t + \Delta t_{CD}) \quad (3.7)$$

$u_1(t)$ 為被衝擊桿表面-試片的位移， $u_2(t)$ 為試片至傳遞桿表面的位
移：

$$u_1(t) = c_0 \int_0^t (-\varepsilon_i + \varepsilon_r) d\tau \quad (3.8)$$

$$u_2(t) = -c_0 \int_0^t \varepsilon_i d\tau \quad (3.9)$$

其中 c_0 為桿子的縱向速度。

試片之應變為：

$$\varepsilon_s = \frac{u_2 - u_1}{l_0} = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (-\varepsilon_i + \varepsilon_i - \varepsilon_r) d\tau \quad (3.10)$$

其中 l_0 為測試試片之長度。

P_1 是被衝撞桿表面與試片的壓縮力， P_2 是試片與傳遞桿表面的壓
縮力，

$$P_1 = AE(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (3.11)$$

$$P_2 = AE\varepsilon_i \quad (3.12)$$

其中 A 是桿子的面積， E 為桿子之楊氏係數(Young's modulus)。

經由應力平衡式 $P_1 = P_2$ ， $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ ，選擇 P_2 來決定應力的值，

$$\sigma_s = \frac{P_2}{A_s} \quad (3.13)$$

其中 A_s 是試片的面積。

比較未添加和添加二氧化矽含量 10%、20%、30% 的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料在受壓縮時的破壞應力，測試的纖維角度包括： 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 90° ，測得之破壞應力數據以及應變率則列於表 3-5 至表 3-8，其中應變率是經由桿子之應變規所測得，並且由時間-應變圖中截取前半段線性部份的方式來求出其應變率，統整各角度之數據平均後，將實驗所得數據之最大值及最小值取平均算出其數據範圍，並且計算出添加二氧化矽後強度增加的比值(表 3-9 至表 3-13)，並且由柱狀圖(圖 3.14)可以發現添加二氧化矽的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料其強度在各角度上皆比未添加二氧化矽之複合材料的強度有上升之趨勢，並且在添加二氧化矽含量達到 30% 時其提升比例最為明顯。動態壓縮實驗測試時(以添加二氧化矽含量 20% 的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料之 5° 試片為例)，先將高壓氮氣壓力調至 50Psi 並且放置緩衝片於被衝擊桿前端，緩衝片之厚度為 1.5mm 的紅銅片，將放大器的放大因子調為 650，並且將示波器的顯示解析度調整為

1v/div，經由示波器記錄的圖形顯示於圖 3.15，並將入射波和反射波以及傳遞波經過時間平移至同一觸發點(圖 3.16)，經由衝擊桿與傳遞桿之力平衡得知數據的可靠性(圖 3.17)，由於兩者之力一致，所以選擇傳遞桿之力並且經由公式 3.13 求出破壞應力並且顯示出時間對應力之曲線(圖 3.18)，經由公式 3.10 可以求出經由桿子上之應變規得到之試片的時間對應變曲線(圖 3.19)，並且由時間對應變曲線前端線性部份得到應變率，統整測試時使用的高壓氮氣壓力及放大器的放大因子整理於表格(表 3-14)。

3.2.2 靜態(Quasi-static)壓縮實驗

萬能材料試驗機(MTS)做為測試靜態(Quasi_static)的壓縮試驗機器，經由特製的半球型底座和凸字型之上壓頭組成測試架構(圖 3.20)，半球型底座主要是確保試片表面與上壓頭表面的平行，以避免試片受力不均勻而產生應力集中現象，夾具與試片上下端皆黏上高強度之碳化鎢(Tungsten carbide)來保護夾具的表面，其碳化鎢必須先經過拋光研磨和鏡面之表面處理，以確保表面之平整光滑而不會與試片接觸面產生阻力，圖 3.21 為現場實驗架構，測試過程中使用位移控制其應變率為 $10^{-4} mm/s$ ，並且分別測試未添加和添加二氧化矽含量 10%、20%、30%於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料之試片，其測試試片之纖維角度包括:0°、5°、10°、15°、90°。

試片之破壞應力可以經由公式求得：

$$\sigma_s = \frac{F}{A_s} \quad (3.14)$$

其中 σ_s 為破壞應力， F 為試片所承受之壓縮力， A_s 為試片的受力面積。

測試的試片規格和動態測試之試片規格一致(圖 3.11)，實驗過程經由位移控制，以 $10^{-4} mm/s$ 的應變率來執行，並且以每秒紀錄一次數據的方式來進行測試，並將添加與未添加二氧化矽含量其破壞強度之數據列於表 3-15 至表 3-18，並將數據平均化後將實驗所得到之數據之最大值與最小值取平均算出其數據範圍，再進一步計算出添加二氧化矽含量後所增加之比值(表 3-9 至表 3-13)，最後的結果用柱狀圖表示(圖 3.22)，可以由柱狀圖發現添加二氧化矽後其破壞強度相較於未添加時之強度在任一角度都有所提升，當添加二氧化矽含量為 30% 時強度提升之比例最為明顯，這個結果和動態測試之結果有相同的趨勢，並且經由未添加二氧化矽與添加二氧化矽含量 30% 之試片破壞情形(圖 3.23 至圖 3.28)來觀察其破壞機制，圖 3.22 為未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30% 之纖維方向 0° 的破壞試片，由於纖維方向 0° 之試片主要是靠纖維在支撐整個受力，當纖維方向無法承受壓縮力時

會瞬間產生破裂，而在纖維方向 0° 中破壞機制分為兩種，其中圖 3.23 (a)和(b)之破壞機制皆屬於微挫屈破壞機制，在試片表面上產生一道挫屈的裂痕，而圖 3.23 為添加二氧化矽含量 30%之纖維方向 0° 的破壞試片其破壞機制為纖維破裂，主要是由纖維產生劇烈的裂開而造成試片兩端明顯破裂，雖然在纖維方向 0° 之破壞機制分為兩種，但其破壞強度相差不大；圖 3.25 至圖 3.27 顯示出分別在纖維方向 5° 、 10° 及 15° 之試片破壞情形，可以發現添加與未添加二氧化矽在不同纖維方向(5° 、 10° 及 15°)的試片表面皆是產生一道微挫屈的破壞機制；圖 3.28 顯示當纖維方向為 90° 時試片的破壞情形，其試片的破壞機制是由於出平面剪應力造成層與層之間滑動而導致試片破壞，經由以上觀察試片之破壞機制可以發現添加奈米級二氧化矽後並不會改變試片之破壞機制，並且可以有效提升其機械強度。

經由掃瞄式電子顯微鏡 (SEM) 來觀察試片細部之破壞情形，分別觀察未添加二氧化矽與添加二氧化矽含量 30%之試片的破裂面(圖 3.29 與圖 3.30)，圖 3.29 中可以發現未添加二氧化矽的試片斷裂面上脫落的纖維幾乎是非常乾淨且光滑，而圖 3.30 顯示出當添加二氧化矽後其試片之破壞試片之纖維表面上黏附許多樹脂，可以證明出添加二氧化矽後可以增強樹脂與基材之間的附着力。

第四章 積層間破壞韌性實驗

本章節將利用施一拉伸力使試片之層與層之間產生脫離，探討添加奈米級二氧化矽(Nano-Silica)、橡膠(Rubber)及雙重顆粒(Hybrid)混合的方式在玻璃纖維/環氧樹脂之層與層之間所帶來的影響，並且分別選用延性(D-230)及脆性硬化劑(H-100)進行破壞韌性試驗。

本研究主要探討第一模態積層間之破壞韌性，因此選用雙懸臂梁實驗(Double Cantilever Beam Test, DCB)。由美國標準實驗準則 ASTM 在 2001 年修正的 D-5528[21]可以得到完整的試片規格及實驗操作流程。本實驗所測試的試片由同向性之玻璃纖維/環氧樹脂複合材料所組成，堆疊 12 層(圖 4.1)其中硬化過程依照選用硬化劑而改變，板材厚度大約都在 3.3mm(表 4-1 與表 4-2)，玻璃纖維所佔體積比約為 47.2%，測試試片規格顯示於圖 4.2，試片總長 230mm，寬度 20mm，並且在第六層與第七層的纖維布中放入一小片離型布，並在裁切好的試片中保留 55mm 的缺口。測試前先用細砂紙將試片兩側先磨過，並且噴上些許的油漆以方便判斷缺陷長度，接著在缺陷之邊緣黏貼活動門扣以方便拉伸實驗機夾取施力(圖 4.3)。

積層間破壞韌性實驗可以經由公式得到一臨界能量釋放率(Critical energy release rate)， G_{IC} ，下標 I 代表第一模式(MODE I)，代

表在一個拉伸-反拉伸循環(Loading-unloading)中單位截面積上所釋放的能量值，其雙臂梁的臨界能量釋放率為：

$$G_{lc} = \frac{3P\delta}{2b(a + \Delta)} \quad (4.1)$$

其中 P 是施力， δ 為試片受力端邊緣張開的距離，b 為試片之寬度，a 為原缺陷長度，由於公式算法是根據一簡單懸臂梁固定一端並在另一端施與一垂直力所推導出，但在 Hashemic[22]等人和 O'Brien[23]等人可以發現本實驗是採用雙懸臂梁試片，其缺陷尖端並不是固定端，所以必須在公式上加上一校正值 $|\Delta|$ ，使缺陷長度變為 $a + |\Delta|$ ，而校正值 $|\Delta|$ 是由撓度開三次方根號與試片缺陷長度在 X-Y 座標上之逼近線，當 Y 軸之值為 0 時，X 軸與座標原點的距離即是校正值，撓度之求法為：

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (4.2)$$

其中 P 是施力， δ 為試片受力端邊緣張開的距離。

本實驗使用實驗儀器為弘達公司所生產 HT-2102 電腦伺服控制材料試驗機(圖 4.4)，使用的荷重元(Load cell)為 200 公斤，由電腦控

制器以 4 秒一點之記錄數據，過程由施力-未施力循環多次的反覆拉伸行為進行測試，初速 3mm/min 的速度定速位移，當試片之缺陷末端開始延伸時將速度調為 0.3mm/min 緩慢拉伸模擬位移幾乎不變，並在缺陷達到 4mm 時以 25mm/min 的反向速度回復到位移起始點。

以添加奈米級二氧化矽含量 20wt%於玻璃纖維/環氧樹脂(脆性)複合材料試片為例，測試之施力與位移曲線循環圖顯示於圖 4.5，並利用修正公式計算出缺陷長度的修正值 $|\Delta|$ (圖 4.6)，每一個試片皆會進行五次以上的循環測試，並且各別求出臨界能量釋放率(Critical energy release rate) (圖 4.7)，最後算出平均值。

4.1 二氧化矽複合材料板材(延性硬化劑)破壞韌性實驗

首先探討添加奈米級二氧化矽含量 10wt%、20wt%於玻璃纖維/環氧樹脂(延性硬化劑)複合材料，其破壞韌性實驗數據列於表 4-3，統整數據平均化並計算相對於未添加二氧化矽所增強的比例(表 4-4)，而圖 4.8 為臨界能量平均釋放率相對於不同二氧化矽含量的柱狀圖，當添加二氧化矽含量 10wt%時其破壞韌性提升 3%，將二氧化矽含量提高至 20wt%時其破壞韌性卻下降 13%，顯示添加二氧化矽在延性基材中會造成樹脂轉變為脆性，試片之破裂面將於 4.3.1 節藉由掃描式電子顯微鏡做進一步探討。

4.2 二氧化矽複合材料板材(脆性硬化劑)破壞韌性實驗

由於在延性基材中其破壞韌性現象並不明顯，並且在參考文獻 [4]、[5]、[6]、[7] 中發現學者選用之硬化劑皆屬於脆性基材，其破壞韌性隨著二氧化矽含量增加韌性也跟隨提升，為了進一步驗證文獻中的現象，另外選用脆性硬化劑(H-100)進行破壞韌性實驗，並且添加奈米級二氧化矽含量 10wt%、20wt%於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料進行破壞韌性實驗，其測試結果列於表 4-5，統整數據平均化並計算相對於未添加二氧化矽所增強的比例列於表 4-6，其中圖 4.9 為平均臨界能量釋放率相對於不同二氧化矽含量的柱狀圖。當添加二氧化矽含量為 10wt%與 20wt%時破壞韌性分別提升 8%與 15%，由測試結果得知破壞韌性隨著二氧化矽含量增加其破壞韌性也跟隨提升。試片之破裂面將於 4.3.2 節藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)做進一步探討。

4.2.1 橡膠複合材料板材(脆性硬化劑)破壞韌性實驗

另外在脆性基材中添加不同類型橡膠(Rubber)於複合材料板材進行探討，添加的橡膠類型及含量分別為液態 CTBN 10wt%、液態 ATBN 10wt%及雙球殼粉體 CSR 10wt%，以及利用雙重顆粒(Hybrid)混合方式添加於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料進行更深入探討。每組試片至少三個以上之測試，整體破壞韌性實驗數據列於表 4.5，並且計算出

增益比例列於表 4.6，其中圖 4.10 為添加橡膠後的平均臨界能量釋放率之柱狀圖。液態橡膠 CTBN 基材製作過程中與樹脂先進行預聚反應，所使用的攪拌溫度分別使用 80°及 120°，經由實驗所測得之破壞韌性分別提升 22%和 36%，其中預聚反應之攪拌溫度使用 120°時，破壞韌性提升比例較明顯卻也造成拉伸強度降低許多，而攪拌溫度為 80°時，其破壞韌性增強比例雖然不及攪拌溫度為 120°的效果，但拉伸強度並沒有攪拌溫度為 120°時降低的明顯，所以選擇攪拌溫度 80°為製作 CTBN 基材時之攪拌溫度。當添加液態橡膠 ATBN 10wt%時，破壞韌性提升將近 40%，但礙於使用 ATBN 時基材之拉伸強度及楊氏係數(Young's Modulus)降低許多，為了避免添加橡膠造成基材本身的強度降低甚多，所以不對橡膠 ATBN 做更深入的探討。而添加雙球殼粉體 CSR 10wt%時其破壞韌性提升 100%。試片之破裂面將於 4.3.2 節藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)做進一步探討。

4.2.2 雙重顆粒(Hybrid)複合材料板材破壞韌性實驗

由結果可以發現添加橡膠可以有效提升材料的韌性，但也造成楊氏係數(Young's modulus)降低，為了獲得韌性及保持原本材料的強度，利用添加二氧化矽與橡膠之雙重顆粒(Hybrid)的混合方式來改善這個缺陷，圖 4.11 為添加雙重顆粒後的平均臨界能量釋放率之柱狀

圖。添加二氧化矽含量 10wt%與橡膠 CTBN 10wt%、ATBN 10wt%、CSR 10wt%時，破壞韌性分別提升 48%、43%、82%，其中添加 CSR_10wt%+Silica_10wt%奈米複合材料之破壞韌性提升達到 82%，由增添二氧化矽而保有和原本基材相近的楊氏係數(Young's modulus)，由結果可以發現可以利用橡膠來增加複合材料之破壞韌性，並且利用混合添加奈米級二氧化矽可以保有原來的機械強度。試片之破裂面將於 4.3.2 節藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)做進一步探討。

4.3 生物型掃描式電子顯微鏡(Bio-SEM)

藉由生物型掃描式電子顯微鏡(Bio-Scanning Electron Microscope, Bio-SEM)型號為 Hitachi S-4700，觀察試片經過破壞韌性測試後之破壞面，探討玻璃纖維與基材之間附著力及破壞情形。試片處理部分，將破壞試片經由鑽石切割機切出大小約為 50mm*50mm 之正方形，並且經由濺鍍器濺鍍金箔 3 分鐘，使其表面具有良好之導電性，加速電壓為 5kV，並將試片放大至 700 倍觀察破壞面

4.3.1 探討二氧化矽於複合材料板材(延性)之附著力

由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試片之破壞面，圖 4.12 為未添加二氧化矽之試片破壞面，其斷裂面上脫落的纖維十分的乾淨且光滑，

顯示出沒有樹脂結塊附著於玻璃纖維表面，圖 4.13 為添加二氧化矽含量 20wt%之試片破壞面，其表面殘留許多樹脂黏著於玻璃纖維上，經由 SEM 觀察試片破壞面得知添加奈米級二氧化矽後有效增加基材與玻璃纖維之間的附著力，從圖 4.12 與圖 4.13 沒有明顯的塑性變形區，但由數據判斷添加二氧化矽於延性基材會造成基材轉為脆性基材，而使破壞韌性下降。

4.3.2 探討橡膠及二氧化矽於複合材料板材(脆性)之附著力

經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試片之破壞面，圖 4.14 為未添加二氧化矽之試片破裂面，其纖維的表面非常的乾淨且光滑，圖 4.15 為添加二氧化矽含量 20wt%之破裂面，其表面變得略為粗糙之外，並有許多樹脂黏著於玻璃纖維的表面，其原因為玻璃纖維本身含有矽的成份，然而添加二氧化矽後增加了基材與纖維之間的黏著力，以及添加奈米級二氧化矽後造成裂紋成長受到顆粒的阻礙，導致裂紋延伸的路徑變得更加複雜，而使破壞韌性提升。

圖 4.16 為添加橡膠 CTBN 10wt%之試片破壞面，其基材表面殘留許多空穴(Cavitations)，這些空穴是由基材中顆粒拔除後殘留下來的痕跡，當裂紋延伸時造成需要更多的能量來拔除橡膠與基材之間的黏著力，進而使破壞韌性達到提升的效果，圖 4.16 為

CTBN_10wt%+Silica_10wt%之試片破壞面，由圖顯示添加雙重顆粒後，其基材表面一樣有許多空穴(Cavitations)產生，然而由圖 4.16 與圖 4.17 並無法判斷出添加二氧化矽後有明顯的差異。

圖 4.18 及圖 4.19 分別為 CSR 10wt%及 CSR_10wt%+Silica_10wt%之試片破壞面，大量的樹脂殘留在纖維上，得知添加 CSR 可以增加纖維與基材之間的附着力，由於添加 CSR 後使得 CSR 受力時造成變形，然而 CSR 與基材之間由於硬度不相同而產生間隙，造成應力集中現象使得基材產生塑性變形，使得基材其表面變的更加粗糙(Rough)以及有許多空穴(Cavitations)等現象產生，此現象和文獻[12]中添加 CSR 後所造成的現象相似，然而這些現象有效抑制裂紋的延伸並且造成裂紋路徑更加複雜，而使破壞韌性提升，由圖 4.16 與圖 4.18 可以比較出添加 CSR 後其破壞面不但有許多空穴產生其粗糙現象非常明顯，並且增加基材與纖維之間的附着力，而證明出添加 CSR 後其破壞韌性提升比例較 CTBN 來的明顯。

統整以上之破壞韌性數據以及參考文獻[24]、[25]破壞韌性結果顯示於圖 4.20，可以由圖中發現當純基材之破壞韌性達到 0.97kJ/m^2 時，添加奈米級二氧化矽將會使破壞韌性下降得到反效果，在玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之破壞韌性超過 1.55kJ/m^2 時，添加奈米級二氧化矽將會造成破壞韌性下降，然而在第一區域內添加二氧化矽無

論在基材或是複合材料中皆可以有效提升破壞韌性，在第二區域中，進一步將二氧化矽與 CTBN 混合後造成基材之破壞韌性下降，在玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料由於破壞韌性未達到極限值而有增韌的效果，由第四區域中得知添加 CSR 後其破壞韌性達到 1.66kJ/m^2 ，當二氧化矽與 CSR 相混後其基材與複合材料之破壞韌性皆下降，由結果發現當基材、複合材料之破壞韌性已經達到極限值後添加二氧化矽將會得到反效果。



第五章 結論

本研究探討奈米級二氧化矽對於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料之機械性質的影響，分別進行剪應力、靜態/動態壓縮實驗及破壞韌性實驗，其中破壞韌性實驗中探討二氧化矽於延性基材與脆性基材之機械性質，並且於脆性基材中添加橡膠做更深入的探討，最後以電子顯微鏡觀察試片之內部的破壞情形並探討其破壞機制，其結果如下所述。

1. 在剪應力及靜態/動態壓縮實驗中，添加二氧化矽有助於增加纖維與基材之間的附著力，而使機械強度提升，在壓縮實驗中，其破壞強度增加趨勢在靜態/動態壓縮並無差異，在添加二氧化矽含量為 30wt% 時增加強度最為明顯。

2. 添加二氧化矽於延性基材中，破壞韌性提升現象並不明顯反而有下降的趨勢，然而添加二氧化矽於脆性基材中，由電子顯微鏡觀察試片得知裂紋路徑變的複雜而使破壞韌性提升；添加 CTBN 橡膠及 CSR 橡膠於脆性基材中皆有助於提升破壞韌性，增加比例分別為 22% 及 100%，在雙重粉體中，由於添加 CSR 後其基材破壞韌性已達飽和狀態，將二氧化矽與 CSR 相混合後卻得到反效果，但將二氧化矽與 CTBN 相混合後，由於添加 CTBN 時其破壞韌性未達飽和值，以致於

添加二氧化矽後可以提升破壞韌性。在破壞韌性當中，欲添加二氧化矽來改善破壞韌性時，首先要先瞭解未添加二氧化矽時其破壞韌性的最大值，在本研究當中破壞韌性之極限值為 1.55kJ/m^2 ，當破壞韌性已經達到極限值時添加二氧化矽將會造成反效果，而使破壞韌性下降，若破壞強度未達最大值時，添加二氧化矽才會有提升的效果。



參考文獻

- [1] Qiu, J., Zhang, C., Wang, B. and Liang, R. (2007). Carbon Nanotube Integrated Multifunctional Multiscale Composites, *Nanotechnology*, **18**(27): 275708.
- [2] Bekyarova, E., Thostenson, E.T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J., Hahn, H.T., Chou, T.W., Itkis, M.E. and Haddon, R.C. (2007). Multiscale Carbon Nanotube-Carbon Fiber Reinforcement for Advanced Epoxy Composites, *Langmuir*, **23**(7): 3970-3974.
- [3] Zheng, Y., Ning, R. and Zheng, Y. (2005). Study of SiO₂ Nanoparticles on the Improved Performance of Epoxy and Fiber Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **24**(3): 223-233.
- [4] Kinloch, A.J., Mohammed, R.D., Taylor, A.C., Eger, C., Sprenger, S. and Egan, D. (2005). The Effect of Silica Nanoparticles and Rubber Particles on the Toughness of Multiphase Thermosetting Epoxy Polymers, *Journal of Materials Science*, **40**(18): 5083-5086.
- [5] Kinloch, A.J., Mohammed, R.D., Taylor, A.C., Sprenger, S. and Egan, D. (2006). The Interlaminar Toughness of Carbon-Fiber Reinforced Plastic Composites Using 'Hybrid-Toughness' Matrices, *Journal of Materials Science*, **41**(15): 5043-5046.
- [6] Kinloch, A.J., Masania, K. and Taylor, A.C. (2008). The Fracture of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Composites Using Nanoparticle-Modified Matrices, *Journal of Materials Science*, **43**(3): 1151-1154
- [7] Siddiqui, N.A., Woo, R.S.C., Kim, J.K., Leung, C.K.Y. and Munir, A. (2007). Mode I Interlaminar Fracture Behavior and Mechanical Properties of CFRPs with Nanoclay-Filled Epoxy Matrix, *Composites: Part A*, **38**(2): 449-460.
- [8] Sprenger, S., Kinloch, A.J., Taylor, A.C., Mohammed, A.C. and Eger, C. (2005). Rubber-Toughened FRCs Optimized by Nanoparticles,

JEC-Composite, **19**: 73-76.

- [9] Cho, J., Chen, J.Y. and Daniel, I.M. (2007). Mechanical Enhancement of Carbon Fiber/Epoxy Composites by Graphite Nanoplatelet Reinforcement, *Scripta Materialia*, **56**(8): 685-688.
- [10] Guo, Y. and Li, Y. (2007). Quasi-static/Dynamic Response of SiO₂-Epoxy Nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, **458**(1-2): 330-335.
- [11] Becker, O., Varley, R.J. and Simon, G.P. (2003). Use of Layered Silicates to Supplementarily Toughen High Performance Epoxy-Carbon Fiber Composites, *Journal of Materials Science letters*, **22**(20): 1411-1414.
- [12] Yan, C., Xiao, K., Ye, L. and Mai, Y.W. (2002). Numerical and Experimental Studies on the Fracture Behavior of Rubber-Toughened Epoxy in Bulk Specimen and Laminated Composites, *Journal of Materials Science*, **37**(5): 921-927.
- [13] Bradley, W.L. (1989). Application of Fracture Mechanics to Composite Materials, *Elsevier Applied Science*, P.159
- [14] Jang, J. and Yang, H. (2000). Toughness Improvement of Carbon-Fiber/Polybenzoxazine Composites by Rubber Modification, *Composites Science and Technology*, **60**(3): 457-463.
- [15] Subramaniyan, A.K. and Sun, C.T. (2007). Toughness Polymeric Composites Using Nanoclay: Crack Tip Scale Effects on Fracture Toughness, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, **38**(1): 34-43.
- [16] Johnsen, B.B., Kinloch, A.J., Mohammed, R.D., Taylor, A.C. and Sprenger, S. (2007). Toughening Mechanisms of Nanoparticle -Modified Epoxy Polymers, *Polymer*, **48**(2): 530-541.
- [17] Keqin, X. and Lin, Y. (2000). Rate-Effect on Fracture Behavior of Core-Shell-Rubber (CSR)-Modified Epoxies, *Polymer Engineering*

and Science, **40**(1): 70-81.

- [18] Mohammed, F.U. and Sun, C.T. (2006). A New Processing Method for High Particle Loading Silica/Alumina/Epoxy Hybrid Nanocomposites, Proceeding of the Twelfth U.S.-Japan Conference on Composite Materials, the University of Michigan-Dearborn, USA, September 21-22.
- [19] Sun, C.T. and Chung, I. (1993). An Oblique End-Tab Design for Testing Off-axis Composite Specimens, *Composites*, **24**(8): 619-623.
- [20] 吳明道, “探討有機黏土在玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料上對於機械性質所造成的影響,” 交通大學機械工程研究所論文, 2006.
- [21] ASTM D5528-01, “Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites”, *Annual Book of ASTM Standards*, 2001.
- [22] Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G. (1989). Corrections Needed in Double-Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fiber-Composites, *Journal of Materials Science Letters*, **8**(2): 125-129.
- [23] O'Brien, T.K. and Martin, R.H. (1993). Round robin Testing for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composites Materials, *Journal of Composites Technology & Research*, **15**(4): 269-281
- [24] 蕭宏, “二氧化矽顆粒對奈米複合材料機械行為之影響,” 交通大學機械工程研究所論文, 2007.
- [25] 黃寶鴻, “奈米顆粒對複合材料機械行為之影響,” 交通大學機械工程研究所論文, 2008.

表 2-1 環氧樹脂/硬化劑以及添加不同含量之補強材

| Epoxy | Hardener | |
|---------------|--------------|-------------------------|
| | D-230 | H-100 |
| DGEBA(C-1532) | Silica_5wt% | Silica_10wt% |
| | Silica_10wt% | Silica_20wt% |
| | Silica_20wt% | ATBN_10wt% |
| | Silica_30wt% | CTBN_10wt% |
| | | CSR_10wt% |
| | | Silica_10wt%_CTBN_10wt% |
| | | Silica_10wt%_ATBN_10wt% |
| | | Silica_10wt%_CSR_10wt% |
| | | |
| | | |



表 3-1 5 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料

板之規格大小與二氧化矽含量及硬化過程壓力對照表

| Silica content (wt%) | Dimension(mm ³) | Pressure(Psi) |
|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 300*300*1.42 | 8.0 |
| 5 | 300*300*1.46 | 8.0 |
| 10 | 300*300*1.44 | 8.2 |
| 20 | 300*300*1.48 | 8.0 |

表 3-2 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受力

方向與纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸破壞強度與二氧化矽含量對照表

| Silica content (wt%) | In-plane shear strength (MPa) |
|----------------------|-------------------------------|
| 0_1 | 23.29 |
| 0_2 | 24.53 |
| 0_3 | 25.16 |
| 5_1 | 27.68 |
| 5_2 | 27.73 |
| 10_1 | 29.95 |
| 10_2 | 30.54 |
| 20_1 | 30.77 |
| 20_2 | 28.77 |
| 20_3 | 30.14 |
| 20_4 | 28.97 |
| 20_5 | 29.30 |
| 20_6 | 30.86 |

表 3-3 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受
力方向與纖維方向呈 10° 偏軸的拉伸破壞強度平均值和強度增加比例與

二氧化矽含量對照表

| Silica content (wt%) | In-plane shear strength (MPa) | Increment (%) |
|----------------------|-------------------------------|---------------|
| 0 | 24.3 | - |
| 5 | 27.7 | 14 |
| 10 | 30.3 | 25 |
| 20 | 29.8 | 23 |



表 3-4 22 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料

板之規格大小與二氧化矽含量及硬化過程壓力對照表

| Silica content (wt%) | Dimension(mm ³) | Pressure(Psi) |
|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 190*90*6.18 | 8.0 |
| 10 | 190*90*6.15 | 8.0 |
| 20 | 190*90*6.13 | 8.0 |
| 30 | 190*90*6.15 | 8.0 |



表 3-5 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在動態

壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) (Strain rate(1/s)) | | |
|-------------------|---|--------------|--------------|
| | 0 | 673 (417) | 675 (434) |
| 5 | 533 (464) | 523 (449) | 536 (435) |
| 10 | 365 (466) | 363 (511) | 361 (599) |
| 15 | 230 (507) | 223 (491) | 225 (651) |
| 90 | 77 (459) | 78 (525) | 75 (664) |



表 3-6 添加二氧化矽含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環

氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|
| | (Strain rate(1/s)) | | |
| 0 | 692 | 705 | 720 |
| | (372) | (391) | (415) |
| 5 | 554 | 566 | 587 |
| | (416) | (462) | (422) |
| 10 | 379 | 419 | 403 |
| | (429) | (448) | (431) |
| 15 | 266 | 247 | 242 |
| | (503) | (480) | (431) |
| 90 | 87 | 100 | 100 |
| | (320) | (352) | (380) |



表 3-7 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環

氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|
| | (Strain rate(1/s)) | | |
| 0 | 703 | 697 | 709 |
| | (405) | (455) | (431) |
| 5 | 584 | 590 | 583 |
| | (414) | (410) | (426) |
| 10 | 394 | 384 | 382 |
| | (507) | (465) | (469) |
| 15 | 239 | 246 | 240 |
| | (329) | (360) | (315) |
| 90 | 84 | 89 | 86 |
| | (420) | (491) | (551) |



表 3-8 添加二氧化矽含量 30wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環

氧樹脂奈米複合材料在動態壓縮實驗之各角度破壞強度及應變率

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) (Strain rate(1/s)) | | | |
|-------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | 0 | 717 (458) | 699 (382) | 742 (414) |
| 5 | 613 (402) | 623 (429) | 644 (425) | 593 (366) |
| 10 | 404 (526) | 410 (510) | 405 (415) | 414 (397) |
| 15 | 242 (523) | 249 (468) | 282 (325) | 269 (328) |
| 90 | 108 (393) | 112 (431) | 118 (392) | 110 (375) |



表 3-9 0°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率

| Silica content(wt%) | Quasi-Static compressive strength(MPa) | Increment (%) | Dynamic compressive strength(MPa) | Increment (%) |
|---------------------|--|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 0 | 415±18 | — | 678±7 | — |
| 10 | 452±13 | 9 | 706±14 | 4 |
| 20 | 445±20 | 7 | 703±6 | 4 |
| 30 | 460±16 | 11 | 720±22 | 6 |

表 3-10 5°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率

| Silica content(wt%) | Quasi-Static compressive strength(MPa) | Increment (%) | Dynamic compressive strength(MPa) | Increment (%) |
|---------------------|--|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 0 | 227±5 | — | 531±7 | — |
| 10 | 253±8 | 11 | 569±17 | 7 |
| 20 | 265±8 | 17 | 586±4 | 10 |
| 30 | 275±22 | 21 | 618±26 | 16 |

表 3-11 10°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率

| Silica content(wt%) | Quasi-Static compressive strength(MPa) | Increment (%) | Dynamic compressive strength(MPa) | Increment (%) |
|---------------------|--|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 0 | 154±3 | — | 363±2 | — |
| 10 | 166±10 | 8 | 400±20 | 10 |
| 20 | 163±7 | 6 | 387±6 | 5 |
| 30 | 179±7 | 16 | 408±5 | 12 |

表 3-12 15°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率

| Silica content(wt%) | Quasi-Static compressive strength(MPa) | Increment (%) | Dynamic compressive strength(MPa) | Increment (%) |
|---------------------|--|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 0 | 117±3 | — | 226±4 | — |
| 10 | 123±2 | 5 | 252±12 | 12 |
| 20 | 124±1 | 6 | 242±4 | 7 |
| 30 | 138±6 | 18 | 261±20 | 15 |

表 3-13 90°之試片在靜態/動態之破壞強度及增加率

| Silica content(wt%) | Quasi-Static compressive strength(MPa) | Increment (%) | Dynamic compressive strength(MPa) | Increment (%) |
|---------------------|--|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 0 | 46±1 | — | 77±2 | — |
| 10 | 52±1 | 13 | 96±7 | 25 |
| 20 | 47±1 | 2 | 86±3 | 12 |
| 30 | 60±2 | 30 | 112±5 | 45 |

表 3-14 動態測試中不同纖維角度所設定的參數

| Fiber orientation | Pressure(Psi) | Gain factor | 解析度 |
|-------------------|---------------|-------------|-----------|
| 0 | 60 | 650 | 1V/div |
| 5 | 50 | 650 | 1V/div |
| 10 | 40 | 500 | 500mV/div |
| 15 | 30 | 500 | 500mV/div |
| 90 | 20 | 280 | 280mV/div |



表 3-15 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在靜

態壓縮實驗之各角度破壞強度

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | |
|-------------------|---------------------------|-----|-----|
| 0 | 422 | 429 | 394 |
| 5 | 223 | 226 | 232 |
| 10 | 151 | 154 | 157 |
| 15 | 121 | 116 | 116 |
| 90 | 46 | 46 | 47 |



表 3-16 添加二氧化矽含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/

環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | | |
|-------------------|---------------------------|-----|-----|-----|
| 0 | 439 | 454 | 464 | — |
| 5 | 256 | 244 | 259 | — |
| 10 | 168 | 152 | 172 | 170 |
| 15 | 125 | 123 | 122 | — |
| 90 | 53 | 52 | 52 | — |



表 3-17 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/

環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | |
|-------------------|---------------------------|-----|-----|
| 0 | 446 | 426 | 465 |
| 5 | 268 | 271 | 256 |
| 10 | 164 | 156 | 169 |
| 15 | 124 | 122 | 124 |
| 90 | 46 | 48 | 47 |



表 3-18 添加二氧化矽含量 30wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/

環氧樹脂奈米複合材料在靜態壓縮實驗之各角度破壞強度

| Fiber orientation | Compressive Strength(MPa) | | | | |
|-------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 481 | 458 | 450 | 450 | — |
| 5 | 246 | 277 | 281 | 289 | 283 |
| 10 | 174 | 187 | 180 | 176 | — |
| 15 | 143 | 132 | 139 | 142 | — |
| 90 | 60 | 60 | 59 | 60 | 58 |



表 4-1 12 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板

(D-230)之規格大小與添加二氧化矽之硬化過程壓力對照表

| Silica content(wt%) | Dimension(mm ³) | Pressure(Psi) |
|---------------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 250*250*3.22 | 8.0 |
| 10 | 250*250*3.25 | 8.5 |
| 20 | 250*250*3.28 | 8.0 |

表 4-2 添加二氧化矽及橡膠之 12 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/

環氧樹脂奈米複合材料板(H-100)規格大小與硬化過程壓力對照表

| Silica content(wt%) | Rubber content(wt%) | Dimension(mm ³) | Pressure(Psi) |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 0 | 250*120*3.26 | 8.0 |
| 10 | 0 | 250*120*3.24 | 8.0 |
| 20 | 0 | 250*120*3.24 | 8.0 |
| 0 | 10(CTBN_80°) | 250*120*3.22 | 8.5 |
| 0 | 10(CTBN_120°) | 250*250*3.21 | 8.5 |
| 0 | 10(ATBN) | 250*250*3.22 | 8.5 |
| 0 | 10(CSR) | 250*250*3.25 | 8.0 |
| 10 | 10(CTBN_80°) | 250*250*3.22 | 8.5 |
| 10 | 10(ATNB) | 250*250*3.20 | 8.5 |
| 10 | 10(CSR) | 250*250*3.25 | 8.0 |

表 4-3 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂(硬化劑 D-230)奈米複
合材料在積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋放率與二氧化矽含量對

照表

| Specimen | $G_{IC}(kJ/m^2)$ |
|----------------|------------------|
| Pure_1 | 1.43±0.08 |
| Pure_2 | 1.57±0.07 |
| Silica_10wt%_1 | 1.54±0.14 |
| Silica_10wt%_2 | 1.57±0.12 |
| Silica_10wt%_3 | 1.55±0.06 |
| Silica_20wt%_1 | 1.27±0.06 |
| Silica_20wt%_2 | 1.33±0.06 |

表 4-4 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(D-230)

在積層間破壞韌性試驗之平均臨界能量釋放率與強度增加比例

| Specimen | $G_{IC}(kJ/m^2)$ | Increment(%) |
|--------------|------------------|--------------|
| Pure | 1.50±0.08 | - |
| Silica_10wt% | 1.55±0.02 | 3 |
| Silica_20wt% | 1.30±0.01 | -13 |

表 4-5 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂(硬化劑 H-100)奈米複

合材料在積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋放率於不同添加二氧化

矽含量及橡膠含量對照表

| Specimen | $G_{IC}(kJ/m^2)$ |
|-------------------------------|------------------|
| Pure_1 | 0.82±0.13 |
| Pure_2 | 0.86±0.10 |
| Pure_3 | 0.79±0.10 |
| Silica_10wt%_1 | 0.89±0.05 |
| Silica_10wt%_2 | 0.92±0.04 |
| Silica_10wt%_3 | 0.90±0.05 |
| Silica_20wt%_1 | 0.92±0.04 |
| Silica_20wt%_2 | 0.98±0.07 |
| CTBN_10wt%_80°_1 | 1.02±0.04 |
| CTBN_10wt%_80°_2 | 1.01±0.05 |
| CTBN_10wt%_80°_3 | 0.99±0.02 |
| CTBN_10wt%_120°_1 | 1.16±0.05 |
| CTBN_10wt%_120°_2 | 1.14±0.04 |
| CTBN_10wt%_120°_3 | 1.08±0.04 |
| ATBN_10wt%_1 | 1.13±0.05 |
| ATBN_10wt%_2 | 1.18±0.07 |
| ATBN_10wt%_3 | 1.14±0.06 |
| CSR_10wt%_1 | 1.66±0.05 |
| CSR_10wt%_2 | 1.61±0.07 |
| CSR_10wt%_3 | 1.71±0.10 |
| CTBN_10wt%_Silica_10wt%_80°_1 | 1.25±0.04 |
| CTBN_10wt%_Silica_10wt%_80°_2 | 1.23±0.08 |
| CTBN_10wt%_Silica_10wt%_80°_3 | 1.22±0.03 |
| ATBN_10wt%_Silica_10wt%_1 | 1.22±0.01 |
| ATBN_10wt%_Silica_10wt%_2 | 1.18±0.05 |
| ATBN_10wt%_Silica_10wt%_3 | 1.19±0.06 |
| CSR_10wt%_Silica_10wt%_1 | 1.53±0.09 |
| CSR_10wt%_Silica_10wt%_2 | 1.59±0.09 |
| CSR_10wt%_Silica_10wt%_3 | 1.42±0.07 |

表 4-6 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)

在積層間破壞韌性試驗之平均臨界能量釋放率與強度增加比例於不

同添加二氧化矽含量和橡膠含量比較表

| Silica content(wt%) | Rubber content(wt%) | $G_{IC}(kJ/m^2)$ | Increment(%) |
|---------------------|---------------------|------------------|--------------|
| 0 | 0 | 0.83 ± 0.04 | - |
| 10 | 0 | 0.90 ± 0.02 | 8 |
| 20 | 0 | 0.95 ± 0.03 | 15 |
| 0 | 10(CTBN_80°) | 1.01 ± 0.03 | 22 |
| 0 | 10(CTBN_120°) | 1.13 ± 0.04 | 36 |
| 0 | 10(ATBN) | 1.15 ± 0.03 | 39 |
| 0 | 10(CSR) | 1.66 ± 0.05 | 100 |
| 10 | 10(CTBN_80°) | 1.23 ± 0.02 | 48 |
| 10 | 10(ATBN) | 1.19 ± 0.02 | 43 |
| 10 | 10(CSR) | 1.51 ± 0.09 | 82 |



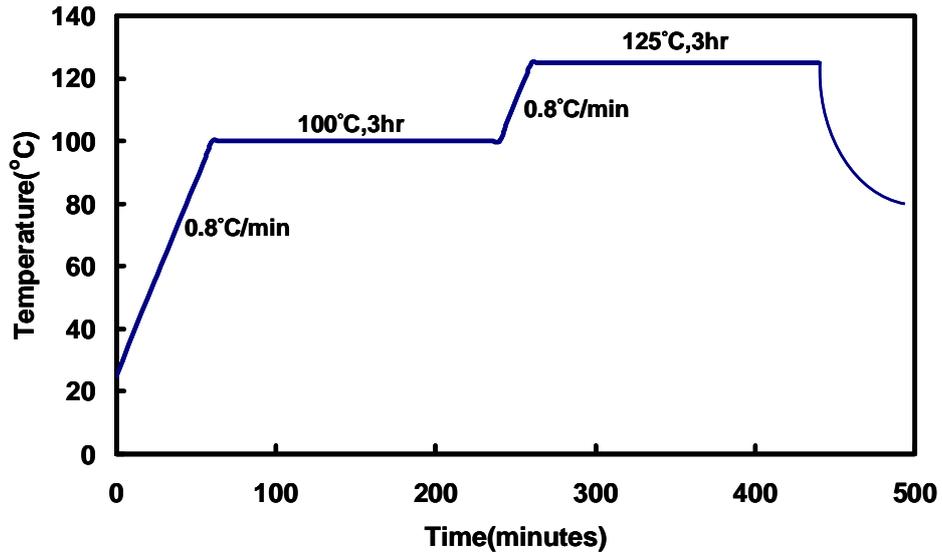


圖 2.1 選用硬化劑為 D-230 時，玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之

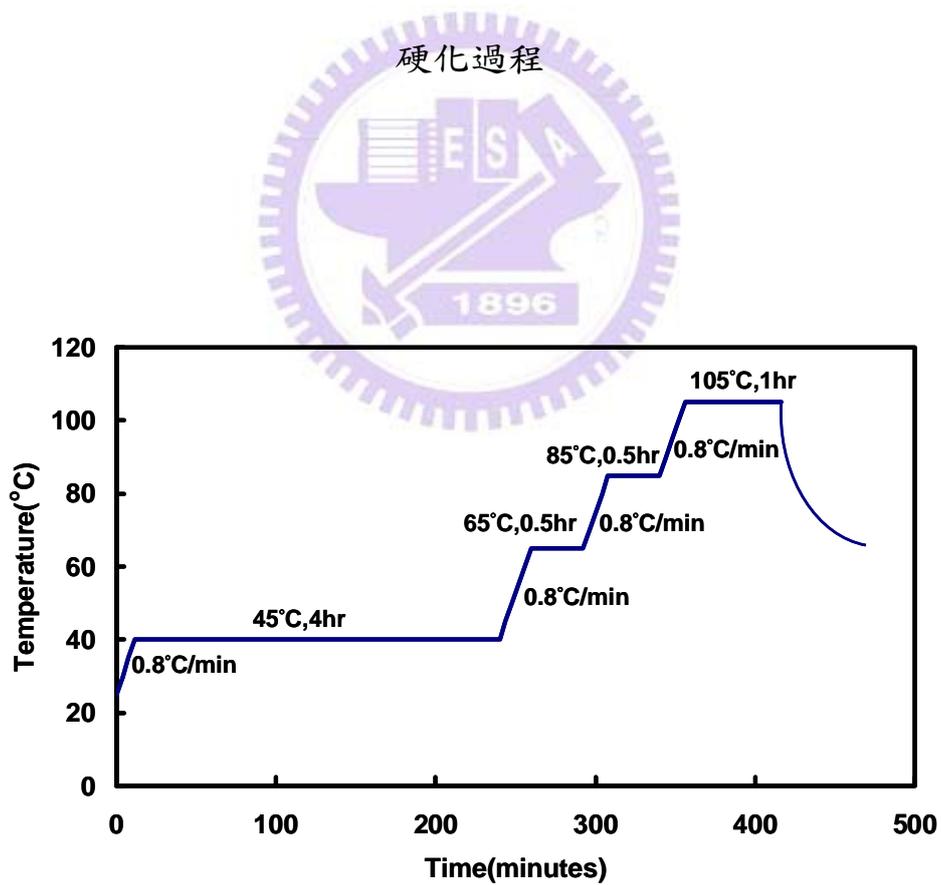


圖 2.2 選用硬化劑為 H-100 時，玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之

硬化過程

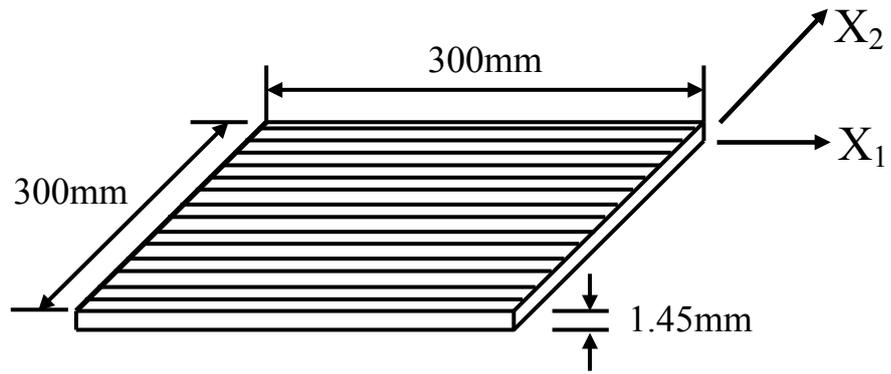


圖 3.1 等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之外型

示意圖

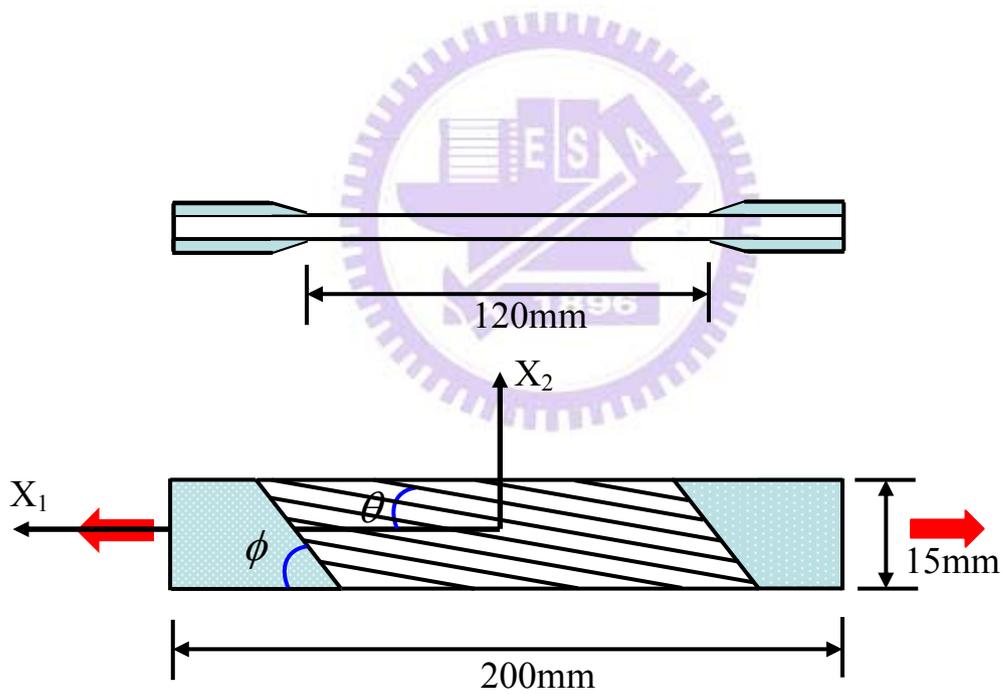


圖 3.2 拉伸試驗之試片規格

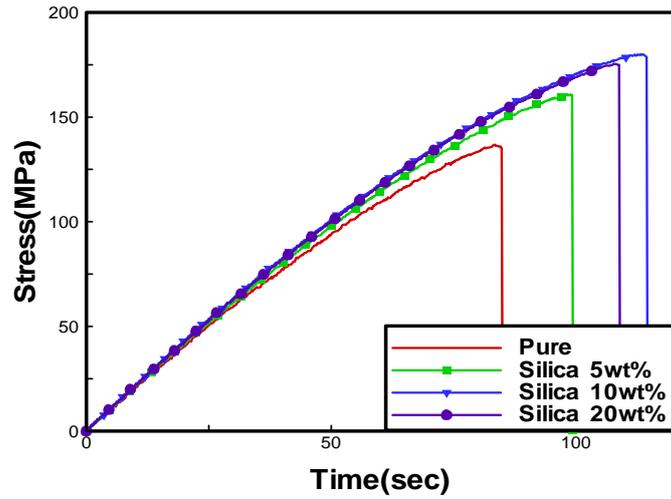


圖 3.3 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線(包含未添加二氧化矽及分別添加二氧化矽含量比重 5% ; 10% ; 20%)

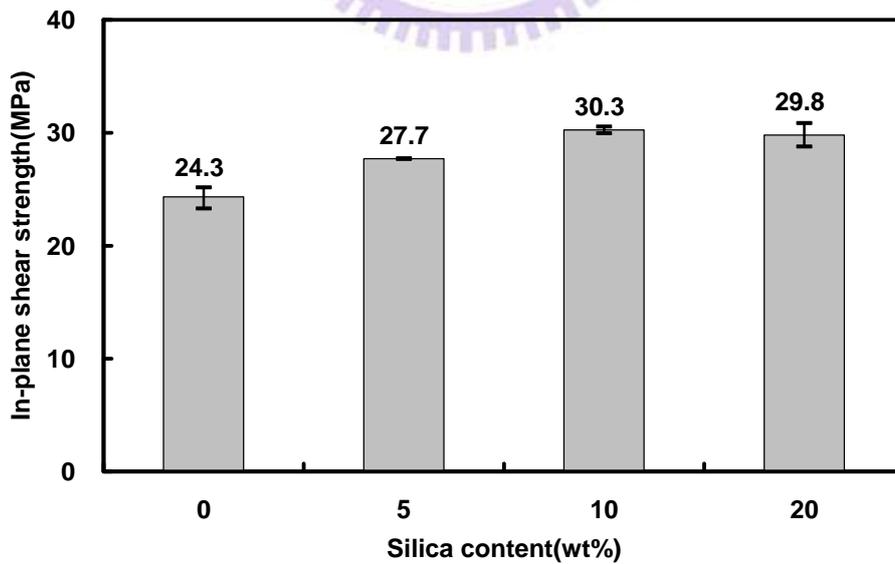


圖 3.4 根據不同二氧化矽含量相對於拉伸試驗之奈米複合材料 $[10]_5$

拉伸強度柱狀圖

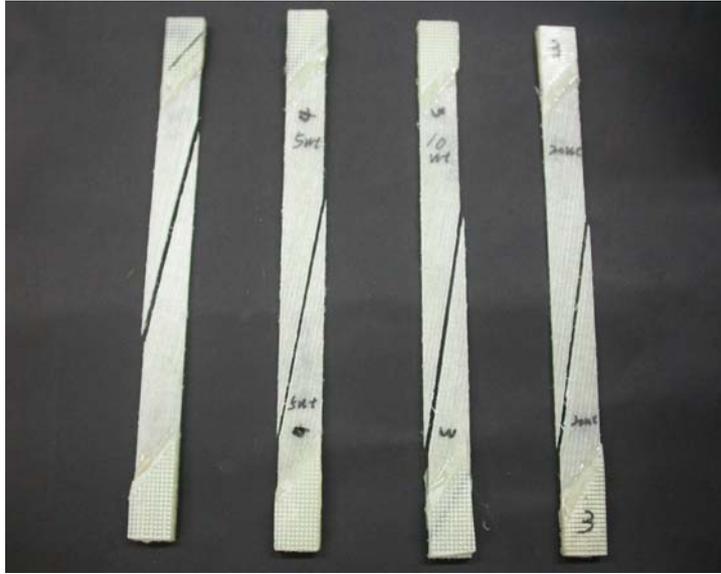


圖 3.5 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在受力方向與纖維方向呈 10 度偏軸的拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為二氧化矽含量比重為 0%；5%；10%；20%)

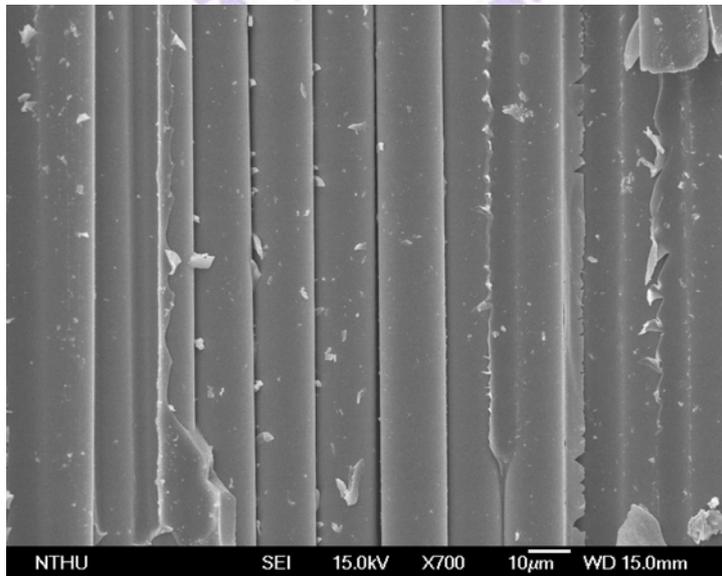


圖 3.6 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

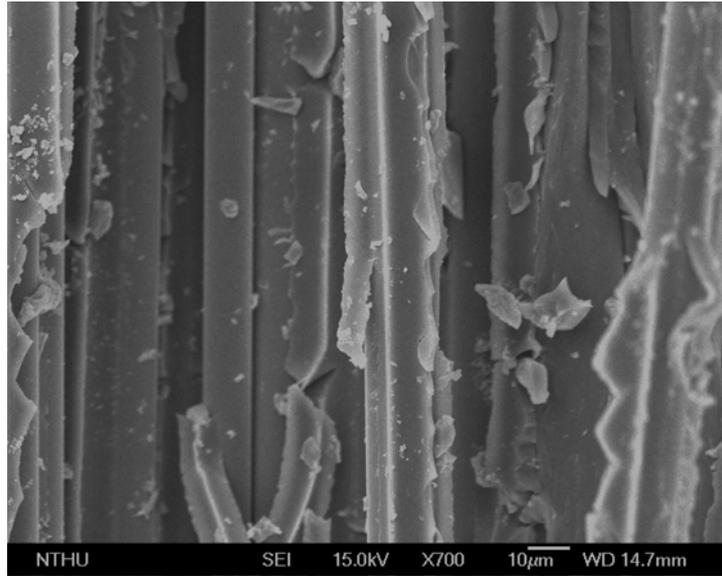


圖 3.7 添加比重為 20%二氧化矽含量之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡

(SEM)觀測斷裂面破壞情形



圖 3.8 霍普金森桿(SHPB)架構



圖 3.9 萬能材料試驗機(MTS)

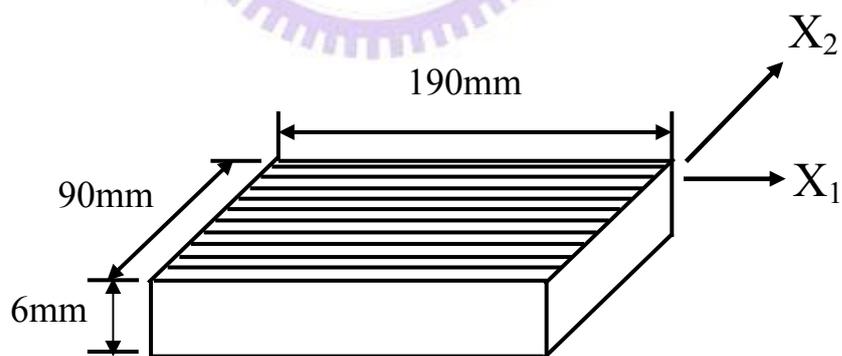


圖 3.10 等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之外
型示意圖

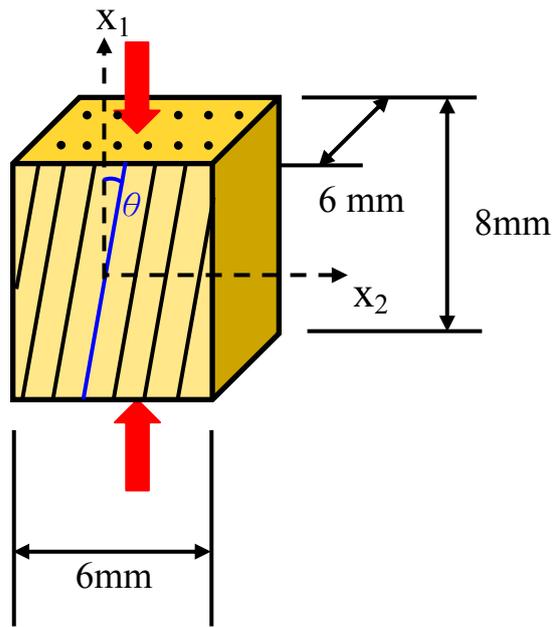


圖 3.11 壓縮實驗之試片規格

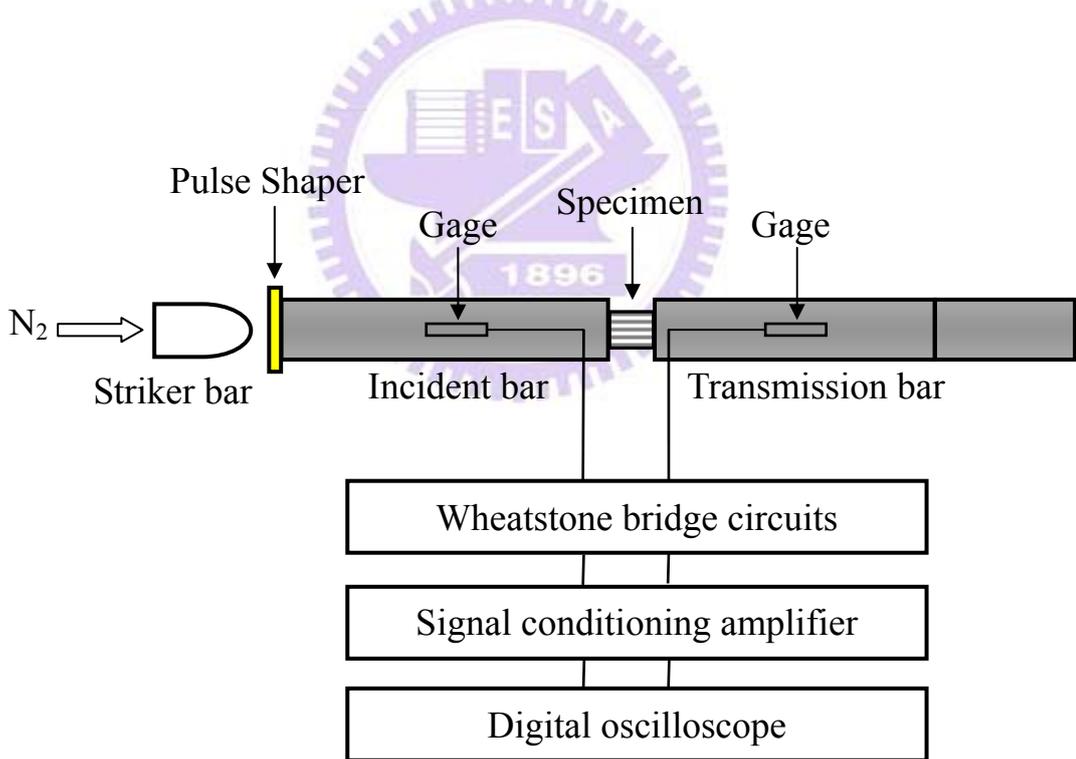


圖 3.12 霍普金森桿(SHPB)示意圖

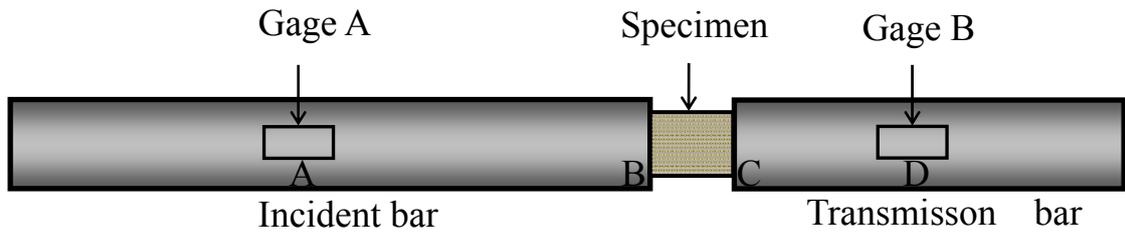


圖 3.13 霍普金森桿(SHPB)的量測圖

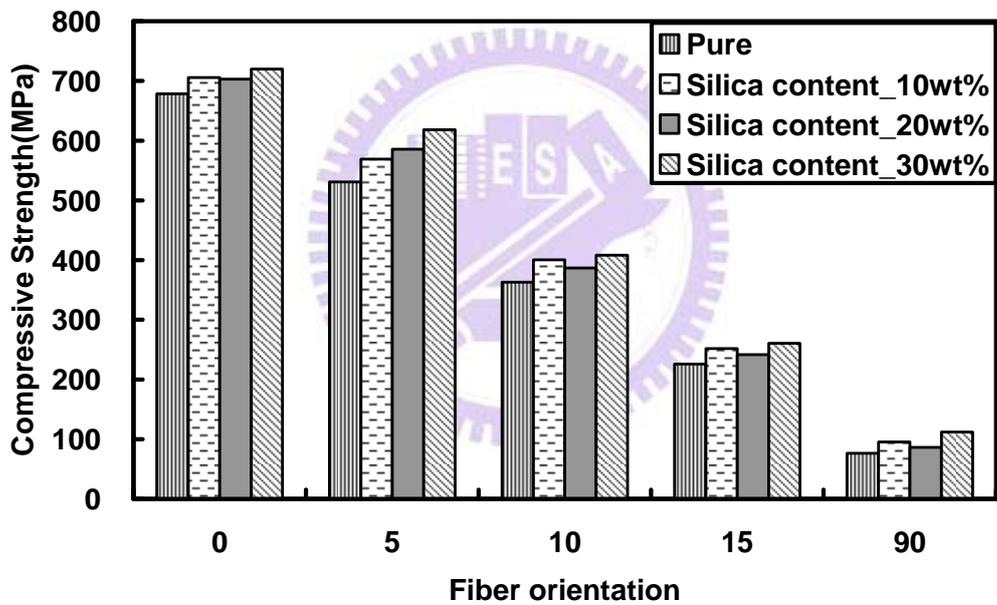


圖 3.14 將 SHPB 測試結果平均化並且比較未添加與添加二氧化矽含量 10%、20%、30%在各角度之破壞強度柱狀圖

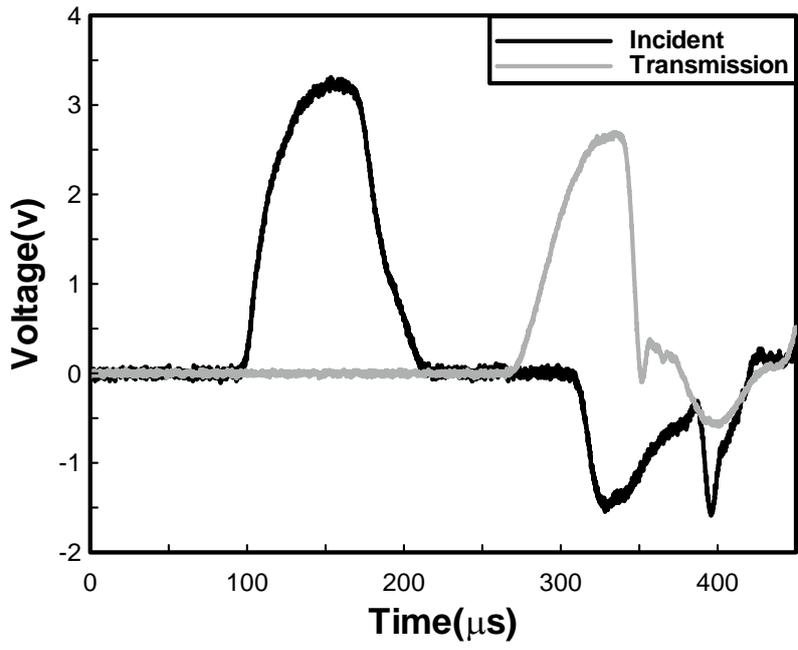


圖 3.15 添加二氧化矽含量 20%之纖維方向 5°試片受衝擊後記錄於示

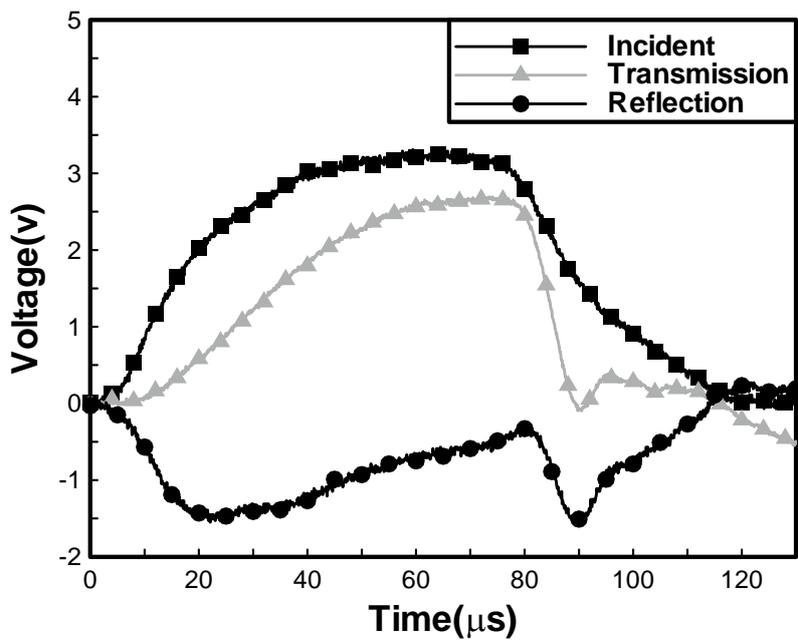


圖 3.16 時間平移將入射波和反射波及傳遞波移至同一時間觸發

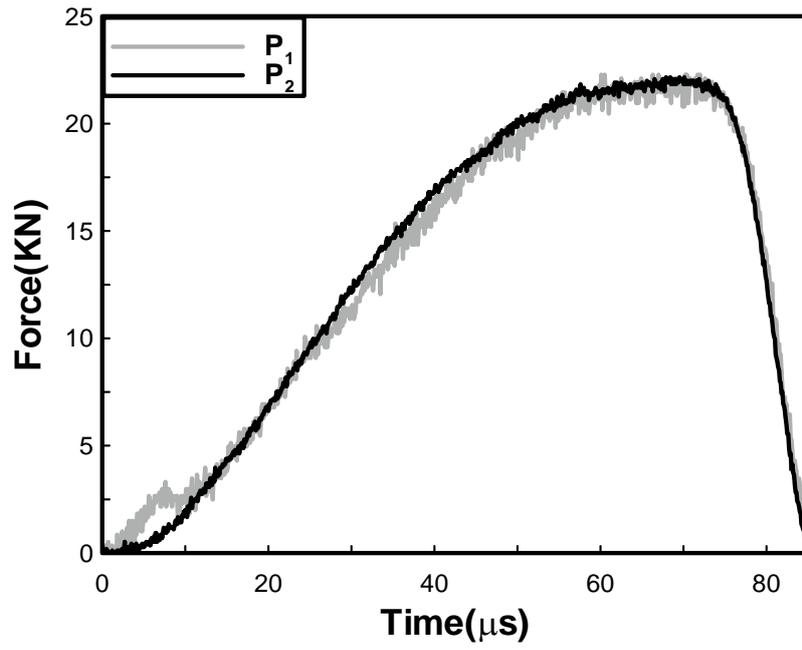


圖 3.17 被動桿和傳遞桿之力平衡的圖形

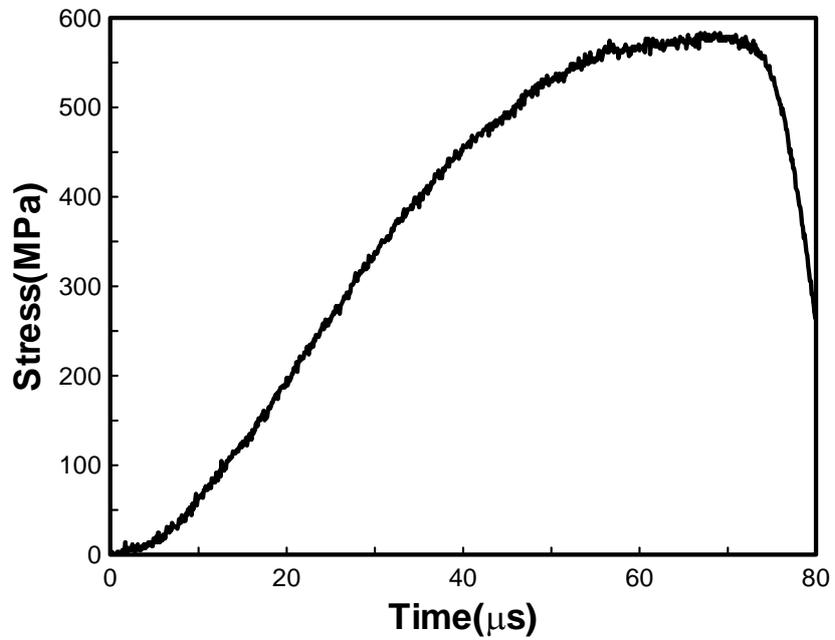


圖 3.18 添加二氧化矽含量 20%在纖維方向 5°之時間對應力之曲線圖

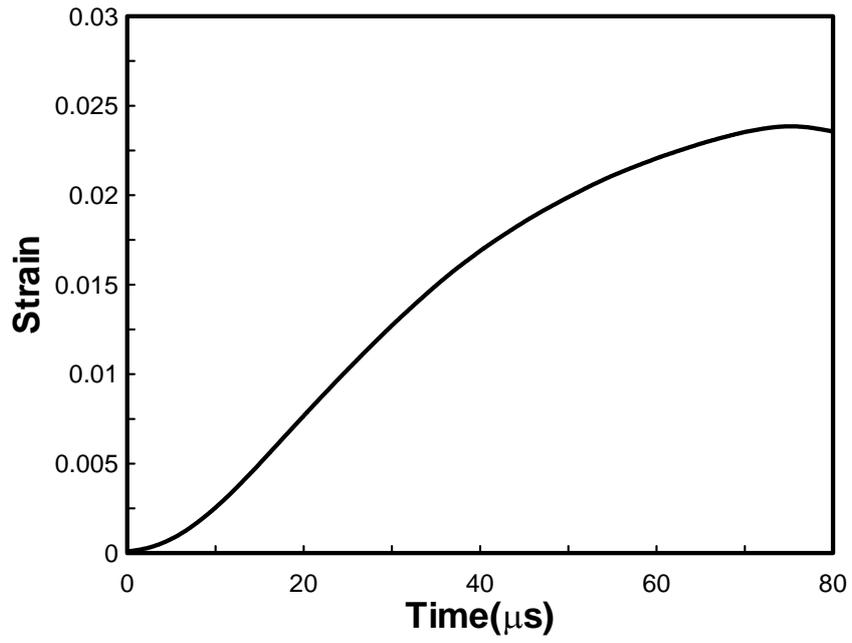


圖 3.19 添加二氧化矽含量 20%在纖維方向 5°之時間對應變之曲線圖

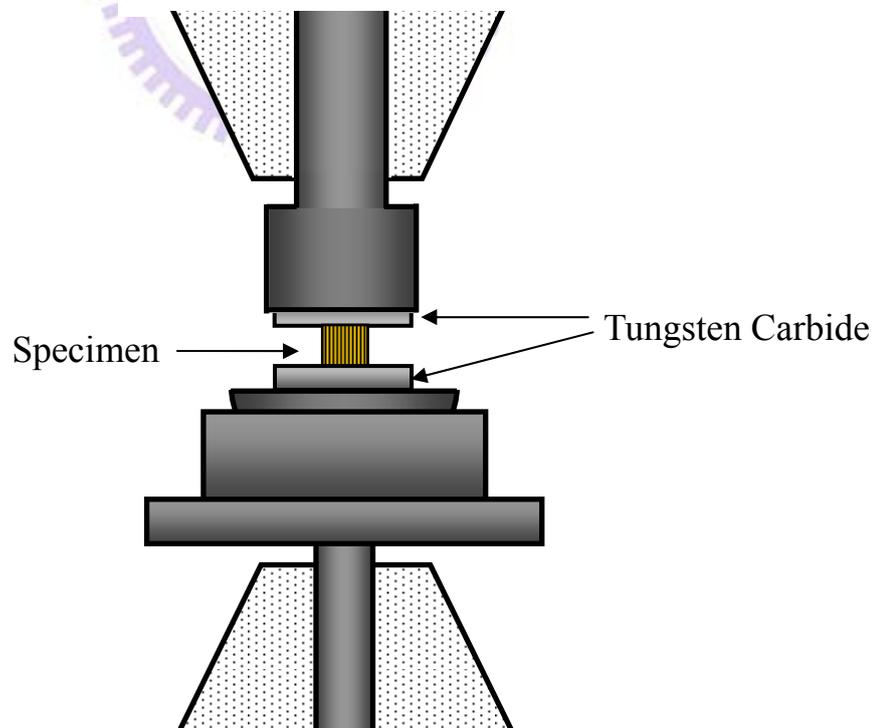


圖 3.20 萬能材料試驗機(MTS)壓縮測試示意圖

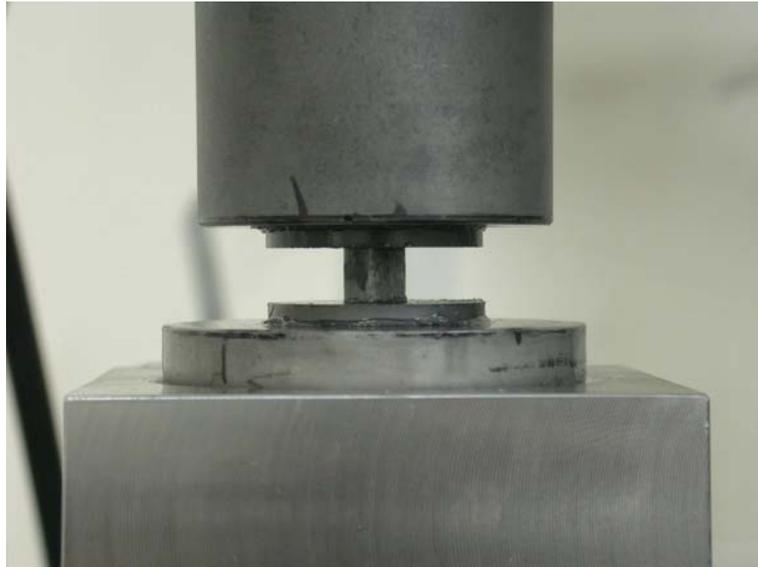


圖 3.21 萬能材料試驗機(MTS)壓縮實驗架構

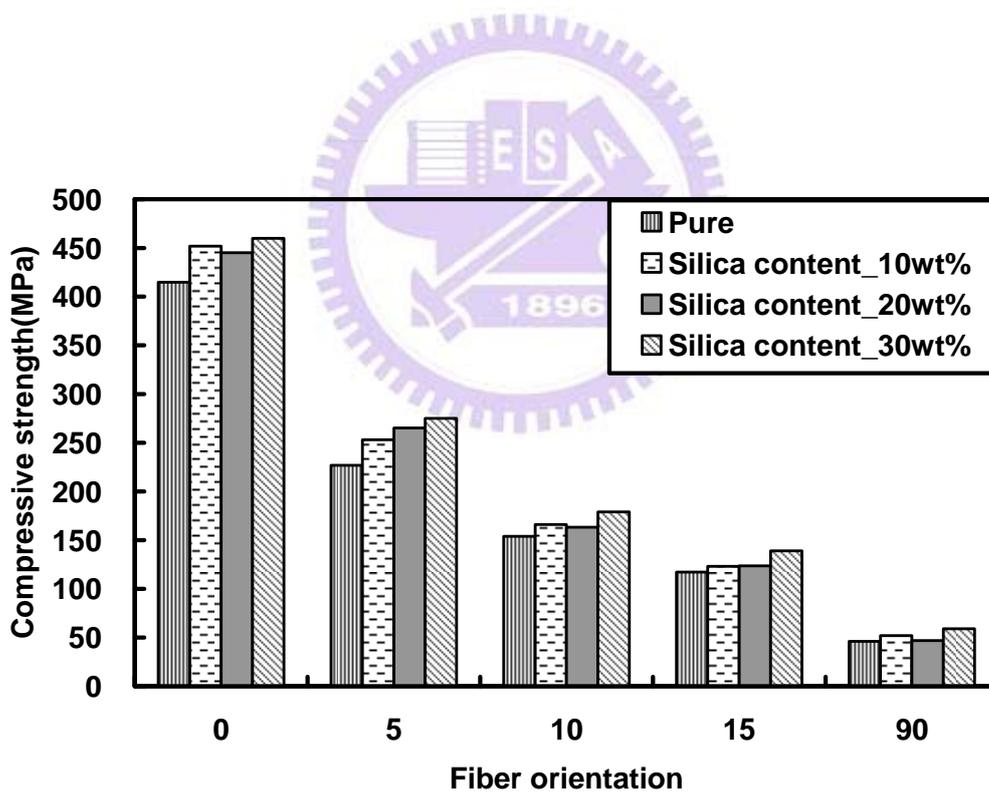


圖 3.22 根據不同角度比較未添加和添加二氧化矽含量 10%、20%、30%之壓縮破壞強度之柱狀圖

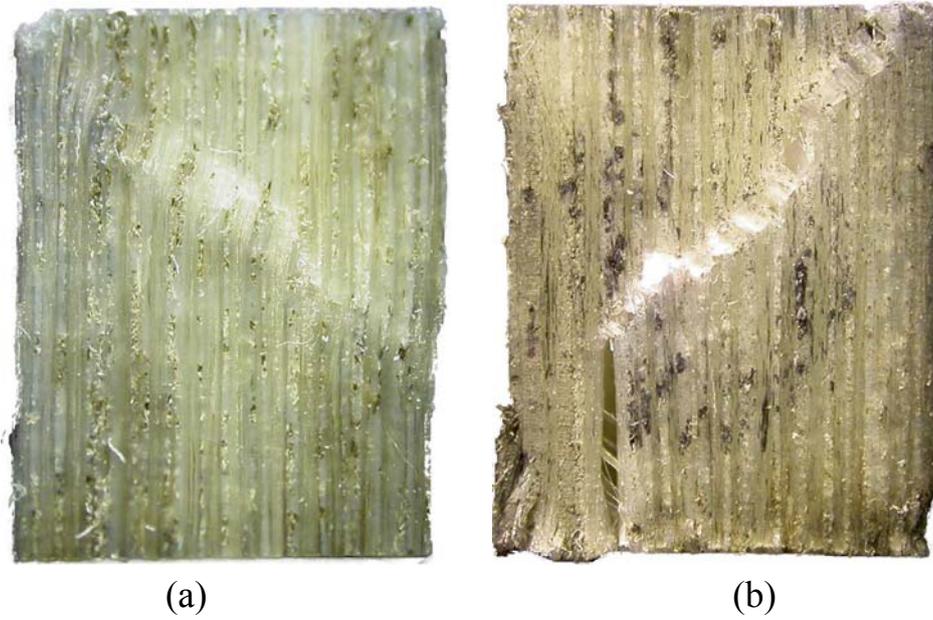


圖 3.23 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 0° 破壞試片之破壞

機制是屬於微挫屈



圖 3.24 添加二氧化矽含量 30%之 0° 之破壞試片

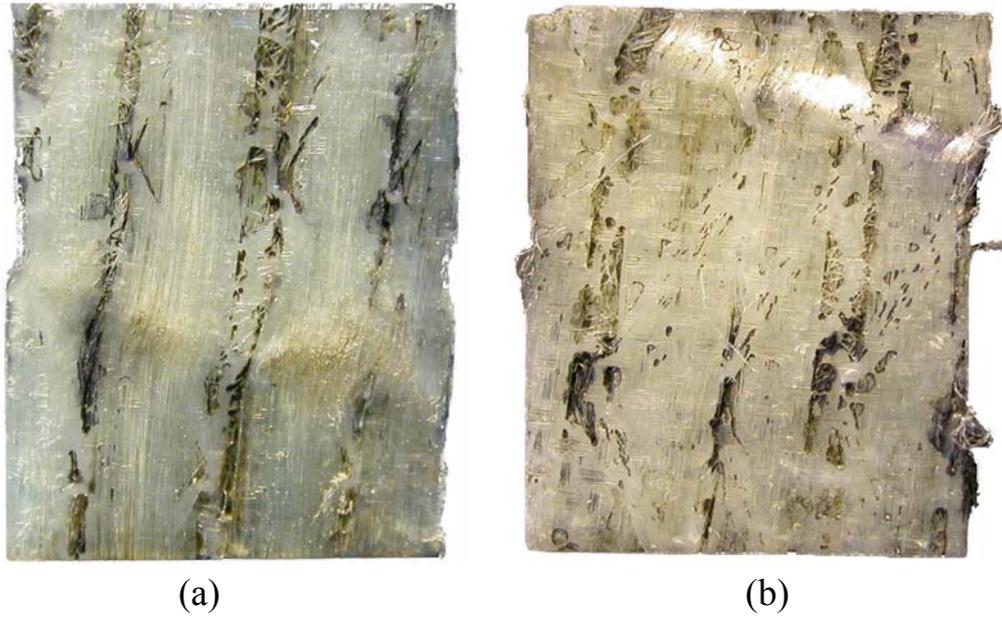


圖 3.25 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 5°破壞試片之破壞

機制是屬於微挫屈

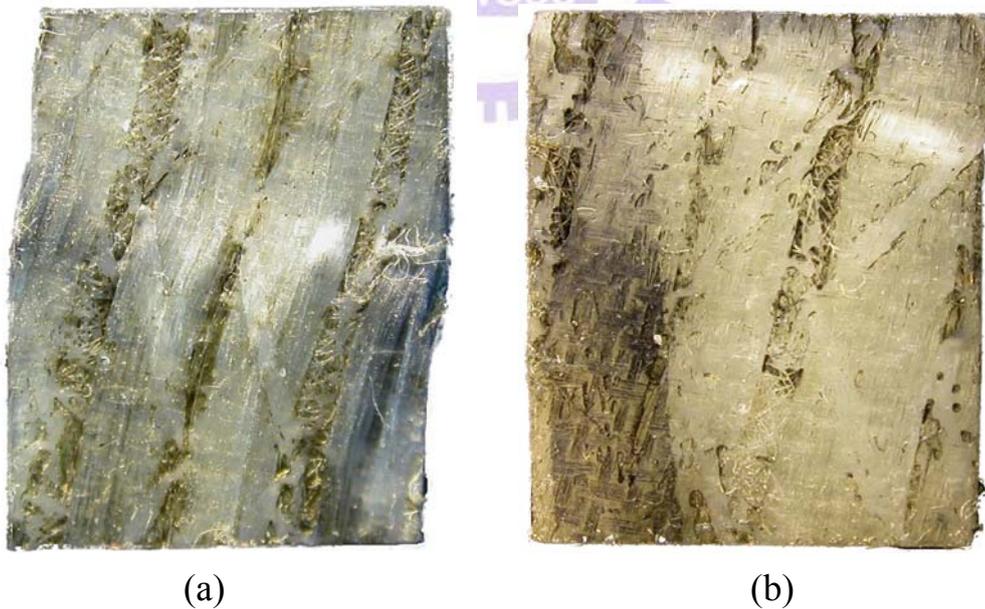


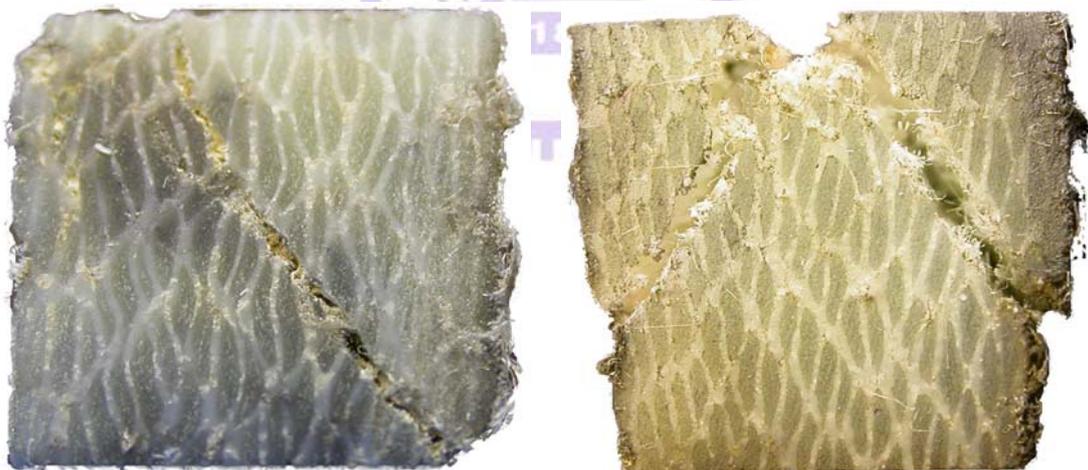
圖 3.26 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 10°破壞試片之破

壞機制是屬於微挫屈



圖 3.27 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 15°破壞試片之破

壞機制是屬於微挫屈



(a)

(b)

圖 3.28 未添加二氧化矽/添加二氧化矽含量 30%之 90°破壞試片之破

壞機制是屬於出平面剪應力破壞

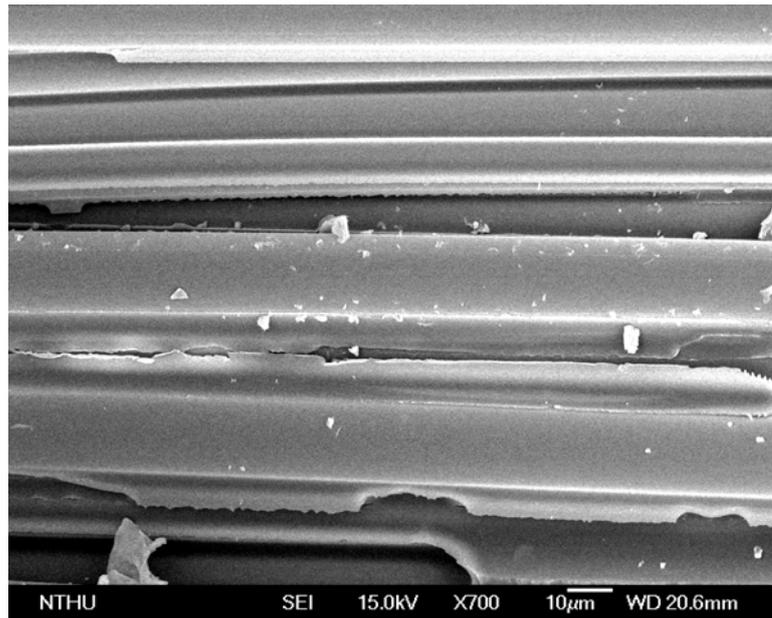


圖 3.29 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

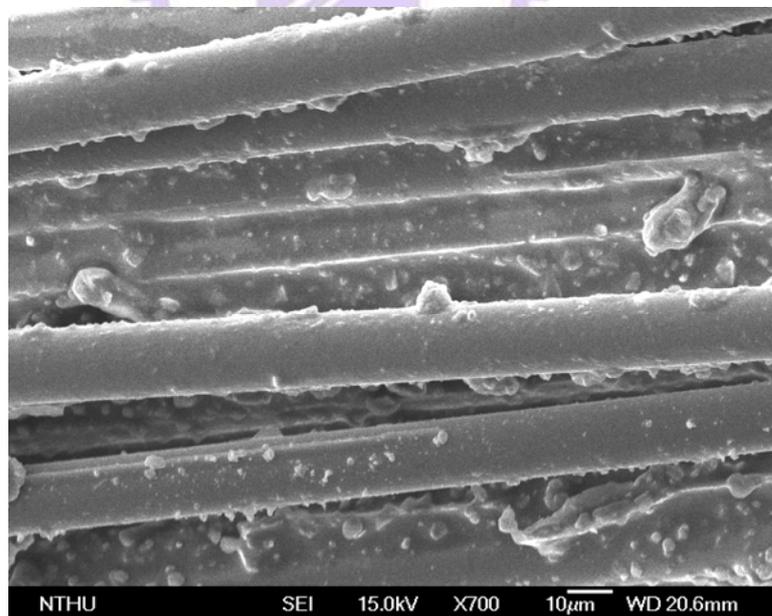


圖 3.30 添加二氧化矽含量 30%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

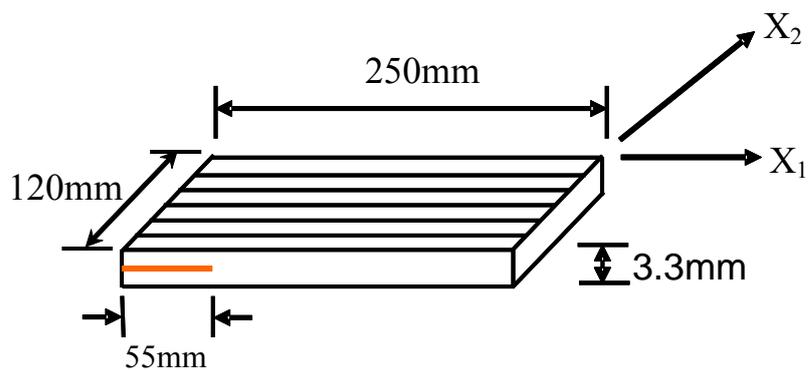


圖 4.1 12 層單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板

之示意圖

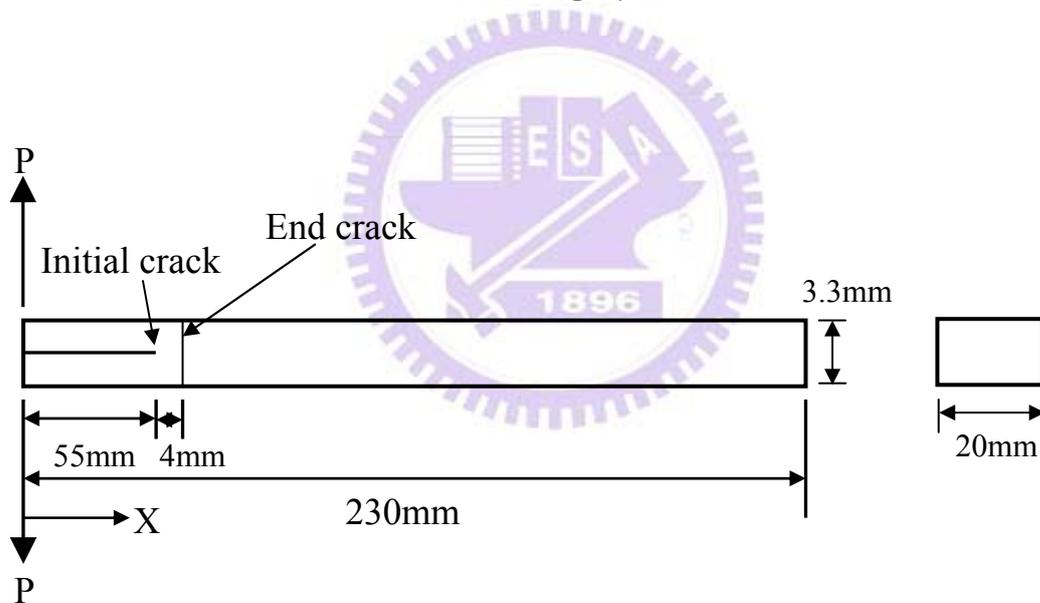


圖 4.2 雙懸臂梁(DCB)試片規格圖



圖 4.3 雙懸臂梁(DCB)實驗圖



圖 4.4 電腦伺服控制材料試驗機

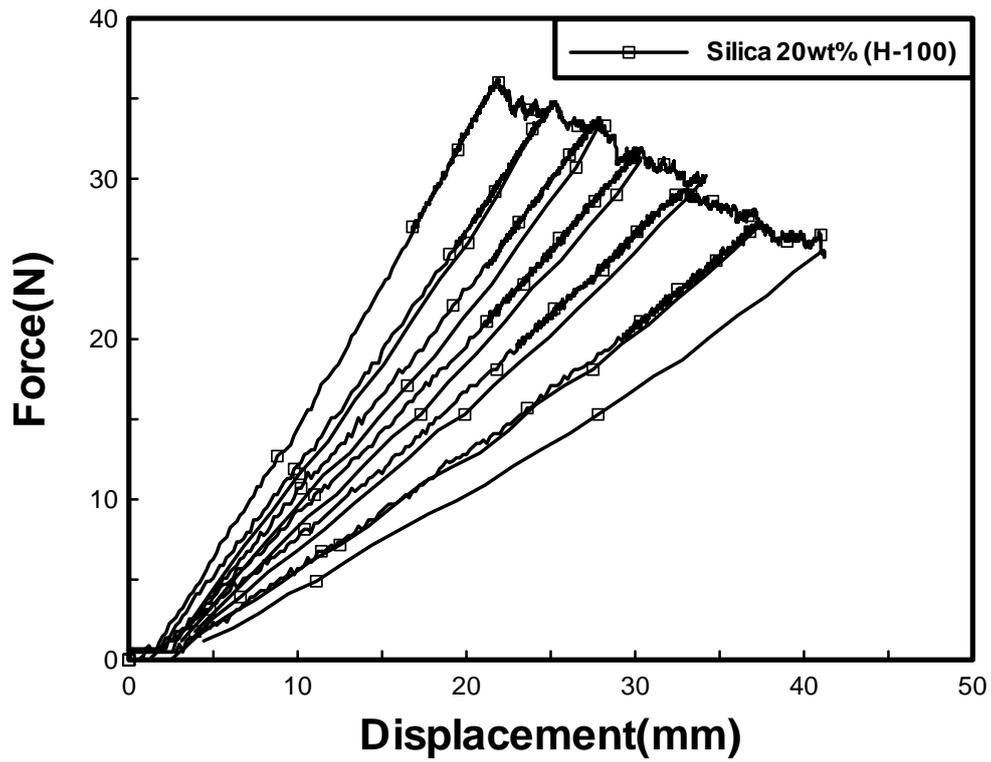


圖 4.5 積層間破壞韌性試驗中施力與位移曲線循環圖

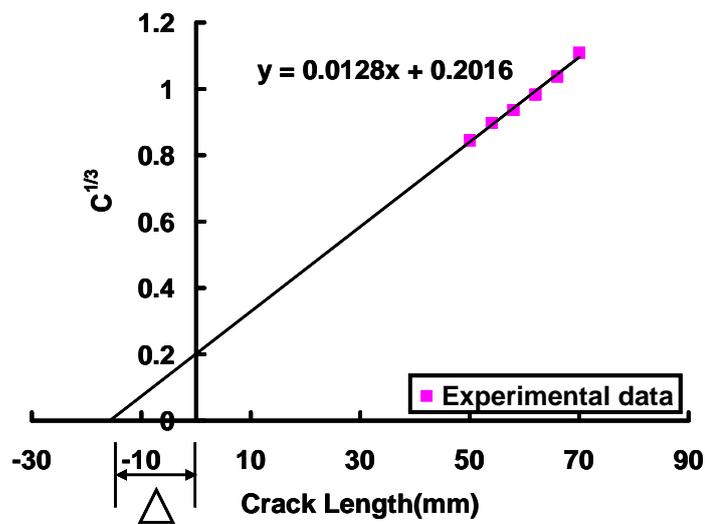


圖 4.6 修正缺陷長度之推导图

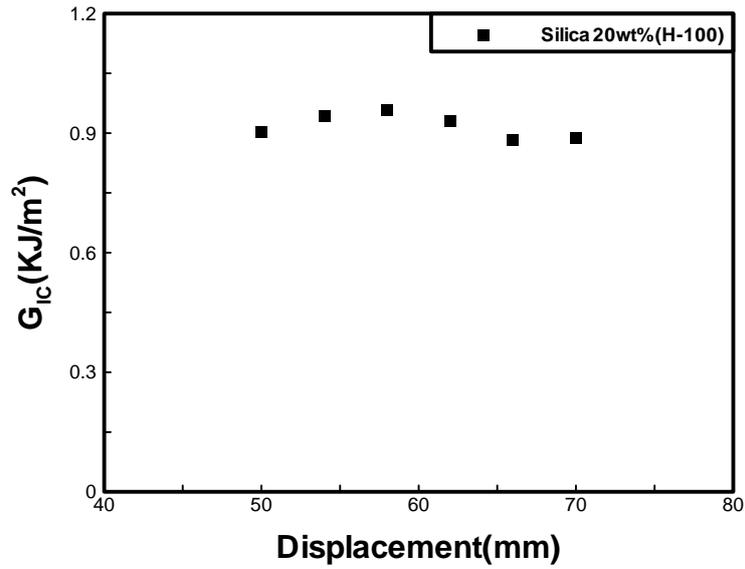


圖 4.7 同一試片進行五次以上的積層間破壞韌性試驗之臨界能量釋

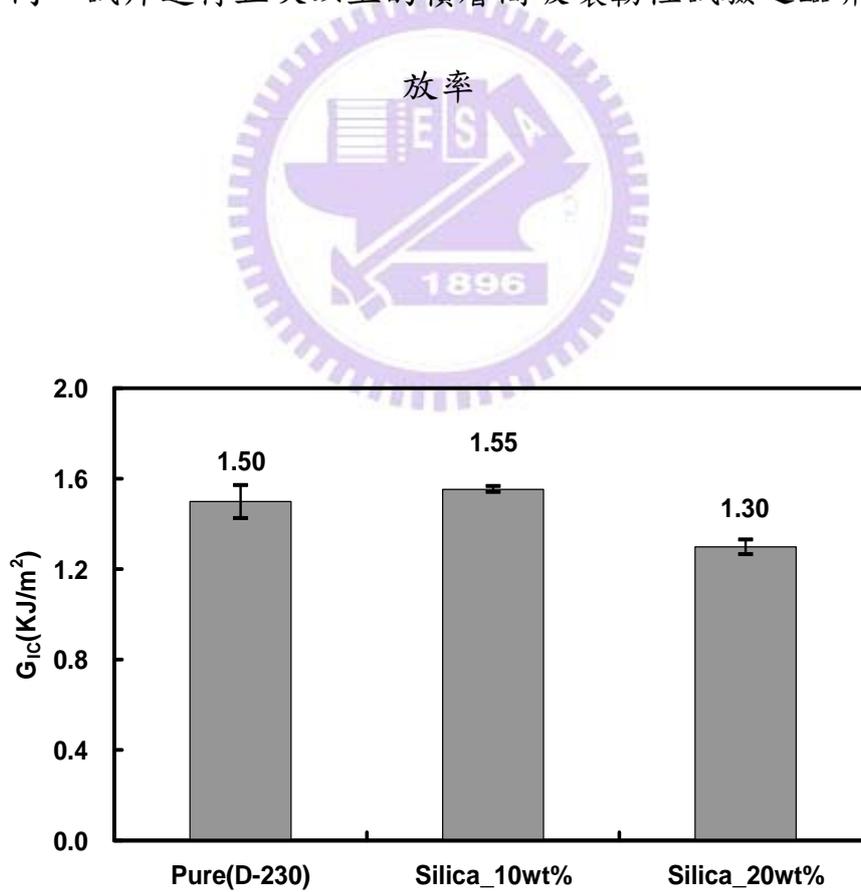


圖 4.8 根據添加不同二氧化矽含量及選用延性硬化劑(D-230)於積層

間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖

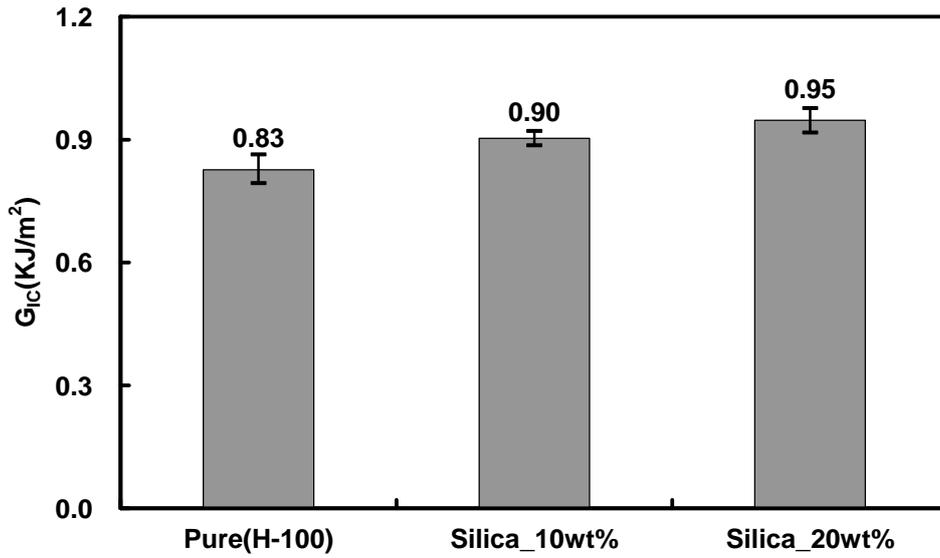


圖 4.9 根據添加不同二氧化矽含量及選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖

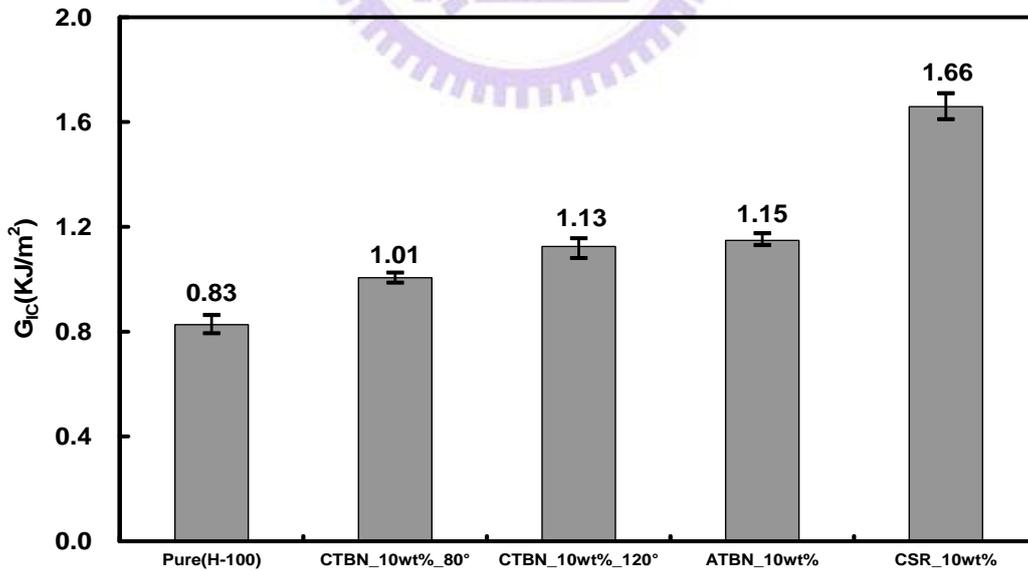


圖 4.10 添加不同橡膠在相同含量下並且選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖

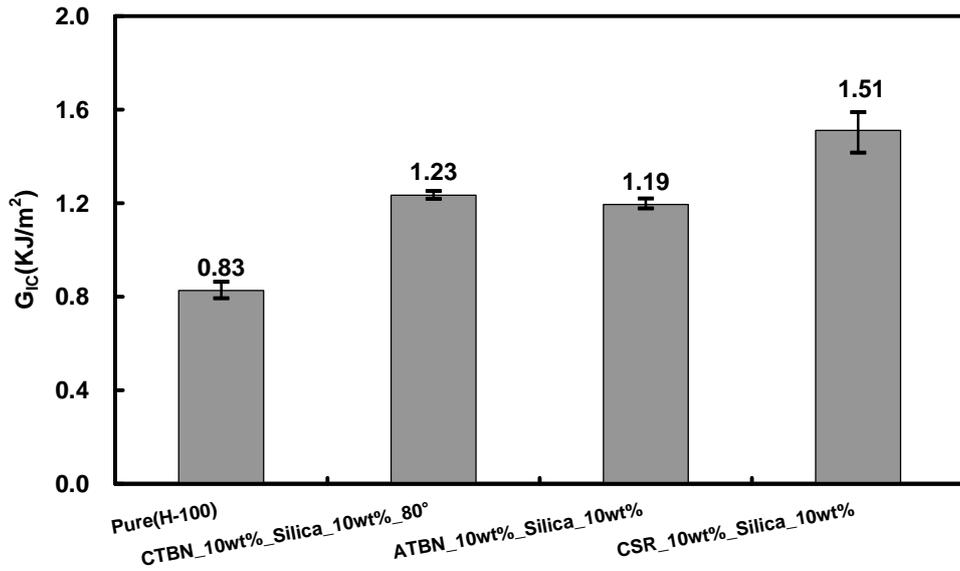


圖 4.11 添加雙重顆粒(Hybrid)在相同含量下並且選用脆性硬化劑(H-100)於積層間破壞韌性之臨界能量釋放率之柱狀圖

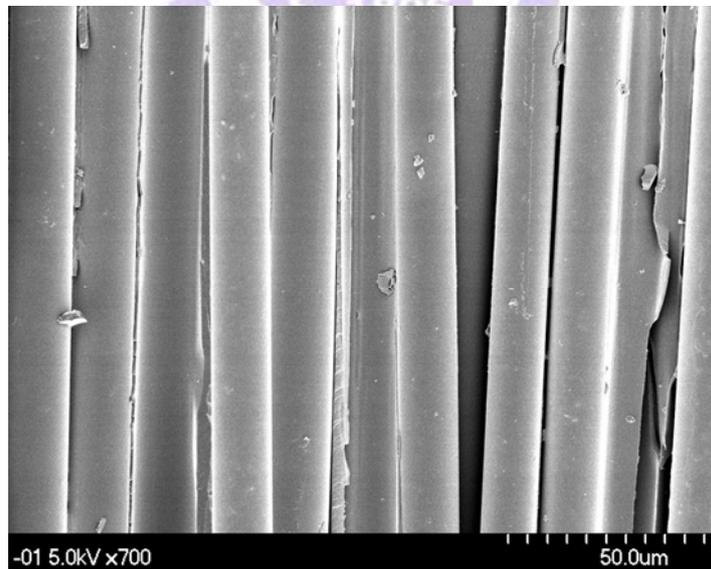


圖 4.12 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(D-230)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測破壞情形

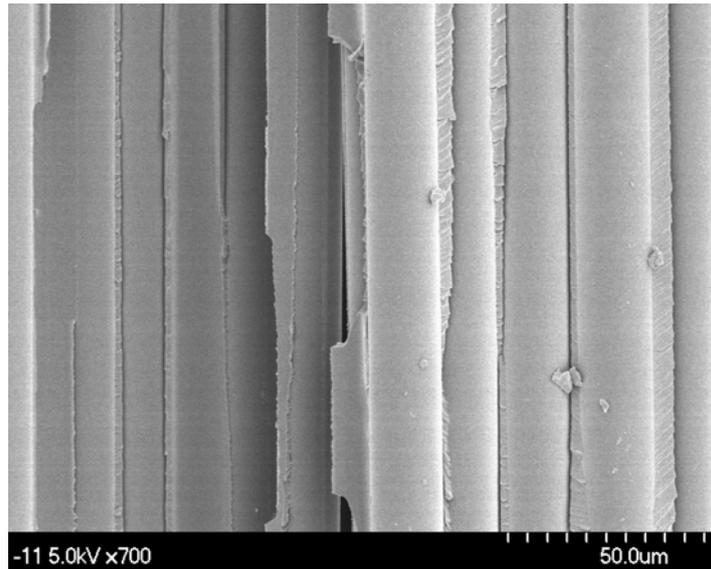


圖 4.13 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/
環氧樹脂奈米複合材料(D-230)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測破

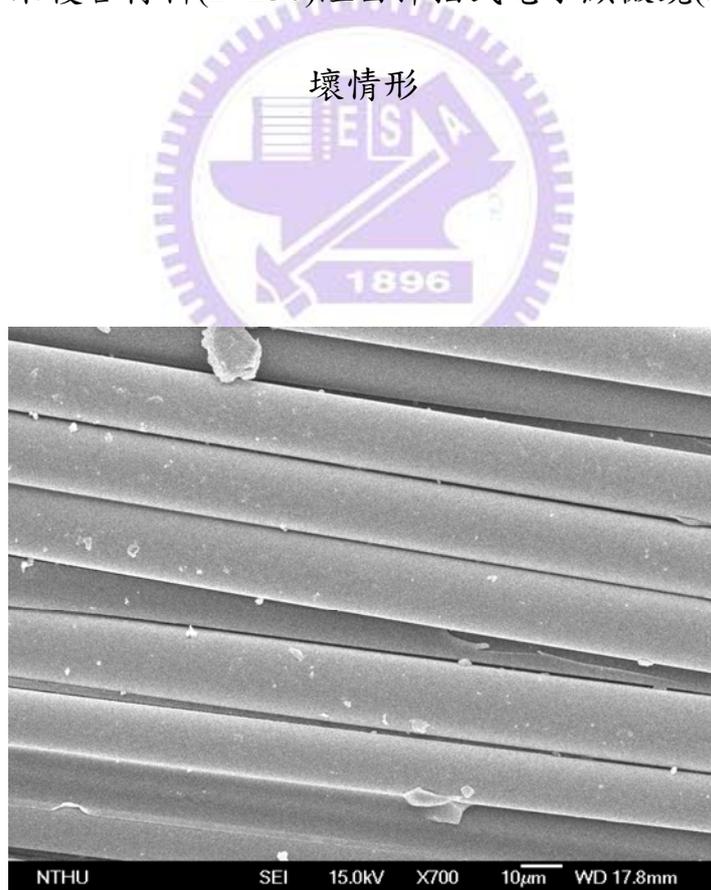


圖 4.14 單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)

經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

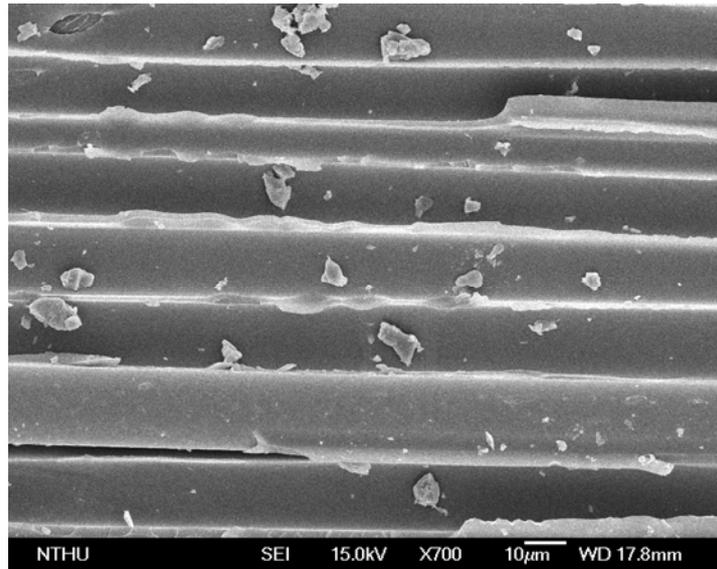


圖 4.15 添加二氧化矽含量 20wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷

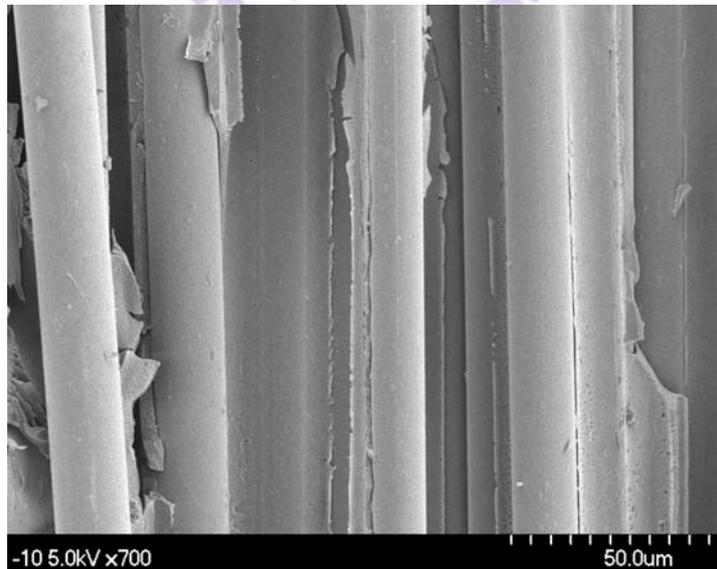


圖 4.16 添加 CTBN 含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形

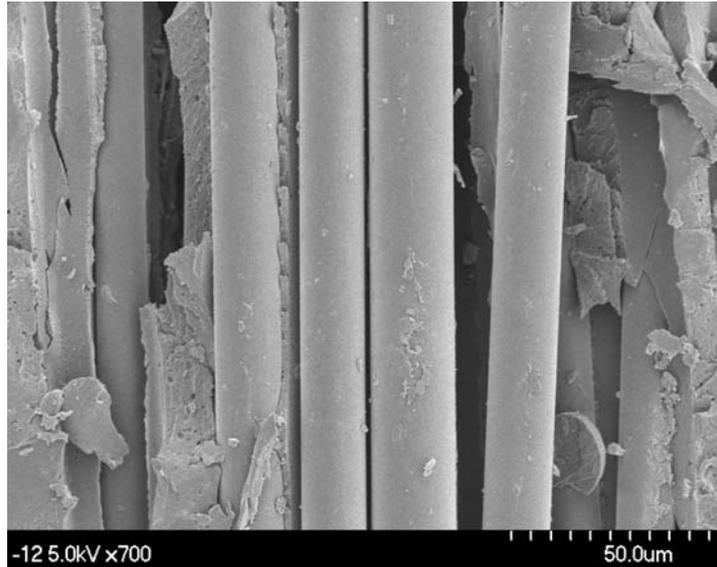


圖 4.17 添加雙重顆粒含量 10wt% CTBN+10wt% Silica 之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂

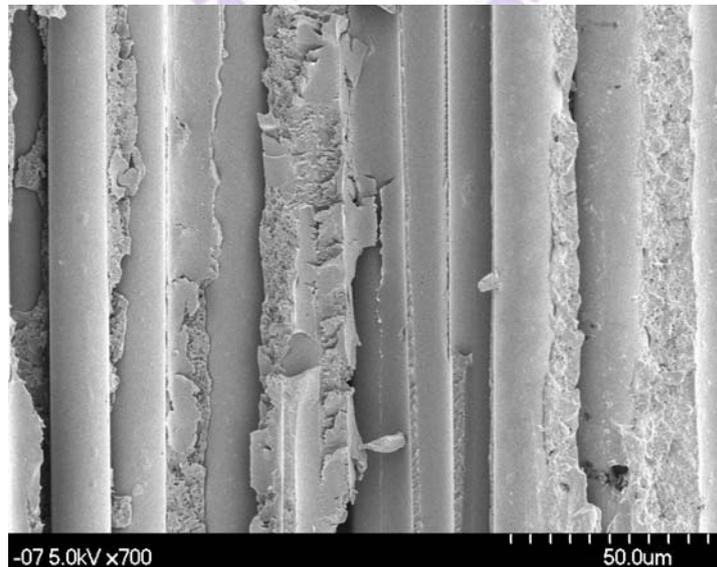


圖 4.18 添加 CSR 含量 10wt%之單方向 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂面破壞情形

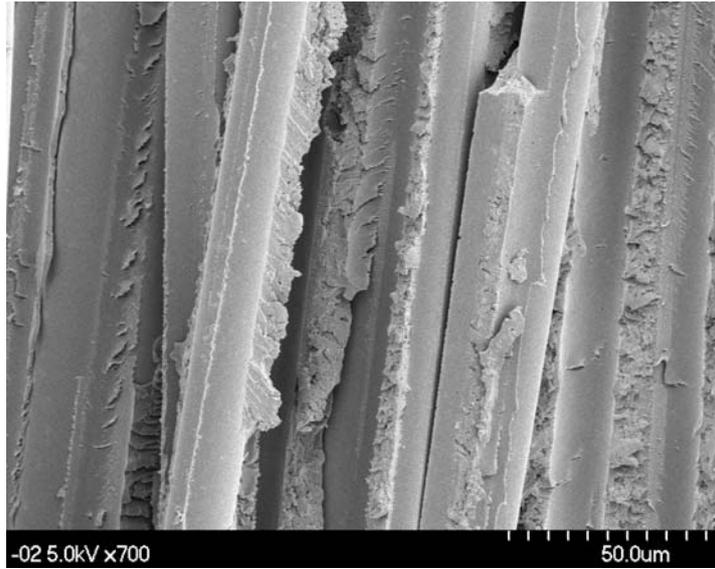


圖 4.19 添加雙重顆粒含量 10wt% CSR+10wt% Silica 之單方向 E-LR
0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料(H-100)經由 SEM 觀測斷裂

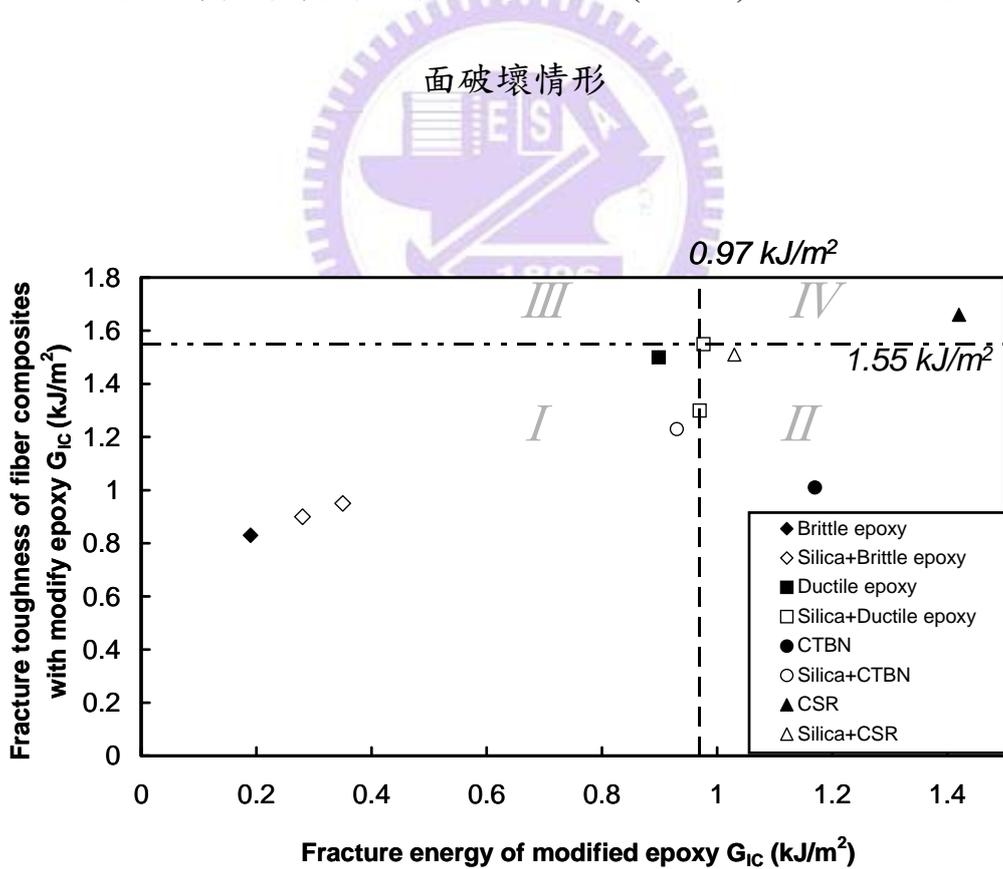


圖 4.20 添加二氧化矽於延性/脆性基材及玻璃纖維/環氧樹脂奈米複
合材料中對於破壞韌性之影響