

菇類太空包木質殘料製備木材塑膠複合材之性質

陳永龍¹ 吳志鴻²

【摘要】本研究以菇類太空包木質殘料及高密度聚乙烯製備木材塑膠複合材 (Wood-plastic composite, WPC)，並利用色差計及全反射式傅立葉轉換紅外線光譜評估 QUV 加速耐候試驗期間，WPC 之表面顏色及官能基變化。試驗結果顯示，隨著耐候試驗時間增加，WPC 之表面顏色逐漸變淺。而由紅外線光譜可以發現，耐候 7 天後之 WPC，其木質材料特性吸收峰 C-O (1031 cm^{-1}) 與羰基 (1735 cm^{-1}) 之相對強度呈現增加之趨勢；而隨著耐候試驗時間持續增加，其相對強度則逐漸下降。此外，加速耐候試驗 28 天後之 WPC 經粉碎處理後直接回收再製成 WPC，並測定其各項物理機械性質，以探討回收再製對 WPC 性質之影響。其試驗結果顯示，回收再製之 WPC，其尺寸安定性與原生 WPC 間無明顯差異。而在力學性質方面，雖然回收再製之 WPC 比抗彎強度 (Specific modulus of rupture, sMOR) 及比抗彎彈性模數 (Specific modulus of elasticity, sMOE) 略低於原生複合材，但對其比內聚強度 (Specific internal bond, sIB) 並無明顯影響，且比木螺釘保持力 (Specific wood screw holding strength, sWS) 較原生複合材高。

【關鍵詞】菇類太空包木質殘料、木材塑膠複合材、QUV 加速耐候、回收、物理機械性質。

Properties of Wood-Plastic Composite Made from Spent Mushroom Cultivation Materials

Yong-Long Chen¹ Jyh-Horng Wu²

【Abstract】In this study, spent mushroom cultivation materials and high density polyethylene were used to manufacture wood-plastic composite (WPC). The spectrophotometer and attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) were employed to evaluate the changes in color and functional groups on the surface of WPC during QUV accelerated weathering. The results demonstrated that the color change of WPC increased with increasing the exposure time of accelerated weathering. Moreover, after accelerated weathering for 7 days, the specific absorption peaks of C-O (1031 cm^{-1}) and carbonyl (1735 cm^{-1}) were significantly increased in ATR-FTIR spectra. However, with increasing the exposure time of accelerated weathering, both relative absorption intensities of 1031 cm^{-1} and 1735 cm^{-1} were decreased. After 28 days of QUV accelerated weathering, the WPC was directly smashed and remanufactured into a recycled WPC. Moreover, the effects of recycling and remanufacturing on the physicomechanical properties were also investigated. The results showed that the dimension stability has no significant difference between the recycled and the original WPCs. As for the mechanical properties, the recycled WPC exhibited lower specific modulus of rupture (sMOR) and specific modulus of elasticity (sMOE), similar specific internal bond (sIB), and higher specific wood screw holding strength (sWS) when compared to the original WPC.

【Key words】Spent mushroom cultivation materials, WPC, QUV accelerated weathering, Recycling, Physicomechanical properties.

¹ 國立中興大學森林學系研究生。

Graduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

² 國立中興大學森林學系教授，通訊作者。

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

Corresponding Author, E-mail: eric@nchu.edu.tw.

I、前言

隨著人類文明進步、生活水準提升，除天然資源的開發與利用尤甚從前之外，所導致的「垃圾」問題更是今非昔比。有鑒於此，資源回收及再利用的觀念，愈來愈被重視。在眾多的天然資源中，「森林資源」為地球極為重要的資產之一，除孕育豐富且多樣的物種及生態之外，與人類生活之命脈更是息息相關。因此，對於如何增進木材利用率及木質殘料的回收與再利用等問題，則顯的更為重要；此不單可減少天然資源的浪費，並可有效減少殘料處理時所需之人力及物力。

目前，台灣食用菇類之太空包栽植日益蓬勃發展，其年總產值約 25 億元；相對的，每年太空包廢棄量高達 2 億包，其所產出之木質殘料重量約為 53 萬公噸(蔡宜峰, 1994; 楊紹榮、黃瑞彰, 2002)。雖然目前已有部分的太空包木質殘料利用發酵腐熟製成堆肥，但仍有部分太空包木質殘料被隨意丟棄或焚燒(Hiyama *et al.*, 2013)。因此，如何有效回收並利用此一農林廢棄物，則成為相當重要且有趣的研究主題。而在眾多回收與再利用的方法中，木材塑膠複合材料(Wood-plastic composite, WPC)的製備即為一值得重視且有效的利用方式之一。

事實上，近來以木質粒片作為 WPC 之研究，越來越受到世界各國重視，且其產量及市場占有率均逐年提升，北美地區 WPC 甲板的市場占有率已超過 10% (Winandy *et al.*, 2004)。目前，在美國已有超過 30 家 WPC 甲板製造廠；而除了甲板之外，WPC 亦逐漸取代實木應用於汽車內裝、家具及裝潢材料等用途上，且用量有逐年增加的趨勢 (Lei and Wu, 2010; Mantia and Morreale, 2011)。而隨著 WPC 的發展，相關的研究報告亦相當豐富，而在眾多的研究中，目前主要多著重於原料種類、混合比例、製程條件與界面性質的改善 (Ashori and Nourbakhsh, 2009; Chen *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2012; Gosselin *et al.*, 2011; Hung and Wu, 2010; Leu *et al.*, 2012)。然而，由於 WPC 多應用於戶外用鋪板、窗框、壁板及屋瓦等住宅建築方面，其耐候性之問題亦逐漸受到重視，因此，許多學者已開始著手進行 WPC 之耐候性質等相關研究 (Hung *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Stark *et al.*, 2004; Stark and Matuana, 2007)。

雖然目前 WPC 之耐候性質已大幅提昇，但由於長期的吸脫濕及疏於保養，造成 WPC 的開裂、翹曲及表面顏色的變化，而導致材料的損壞，因此部分學者建議 WPC 之使用年限應為 8-14 年 (Smith, 2001)。但是，目前並無 WPC 回收再製的相關研究，因此，本研究除利用太空包木質殘料混合高密度聚乙烯以製備 WPC 之外，更利用 QUV 加速耐候試驗機進行耐候試驗，除定期測定耐候期間 WPC 表面顏色及官能基變化之外，並將耐候試驗後之 WPC，經粉碎處理後直接抄製成回收再製之 WPC，同時亦測定其各項性質，以比較回收再製對 WPC 性質之影響。

II、材料與方法

(I) 試驗材料

1. 木質粒片

本研究所使用之木質粒片係取自南投縣埔里鎮福興菌類農場，為種植香菇後之太空包木質殘料，其主要組成樹種為相思樹。以甲醇冷浸萃取 7 天，移除萃取液續以上述相同方式重複萃取 1 次，並將萃取後之木質粒片以 70°C 烘箱乾燥至含水率 3% 以下備用。

2. 高密度聚乙烯

本研究所使用之 HDPE 係購自台灣聚合化學股份有限公司之聯塑烯 (LH-901)，其密度為 953 kg/m³，熔流指數為 0.95 g/10 min。塑膠粒以圓盤式磨粉機進行磨粉處理，並經過篩分機篩分。試驗時，選用通過 30 mesh 之塑膠粉末，以利後續塑膠與木質粒片之混合。

(II) 試驗方法

1. WPC 之製備

WPC 之預設密度為 900 kg/m³，成板尺寸為 200 mm × 300 mm × 12 mm。太空包木質粒片以 70°C 烘箱乾燥至含水率 3% 以下後，以木質粒片/HDPE 混合比 60/40 (w/w) 稱取粒片的用量置入攪拌機。由於木質粒片與塑膠粉末之密度差異大，於抄板過程當中，塑膠粉末易沉降至板坯底層，導致塑膠分布不均進而影響板材性質，因此本試驗添加相對於粒片絕乾重 5% 之大豆油作為黏附劑，以改善木質粒片與塑膠未混合不均之現象。開啟攪拌機後倒入黏附劑，混合 5 min 後將不

同混合比的塑膠粉末倒入，再攪拌 5 min 後取出。稱取所需之混料，均勻撒入成型模具中以抄製板坯。之後，續將板坯放入熱板溫度 200°C、壓力 2.5 MPa 的熱冷交替式平壓機中熱壓 8 min。當板坯中心溫度達 180°C 時，關閉加熱系統並開啟冷卻裝置，以常溫水冷卻循環 10 min，使其板坯中心溫度降至 100°C 後，解壓取出板材，並將 WPC 靜置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中進行調濕處理。

2. 加速耐候處理

本試驗參考 ASTM G 53-88 之試驗方法，採用 Q-Panel (USA) QUV 加速耐候試驗機 (Accelerated weathering tester)，搭配 UVA-340 燈源進行加速耐候試驗。試驗以 UV 光照 8 hr 及水氣凝結 4 hr 循環方式進行，黑板溫度為 $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ，以模擬自然條件下對試材顏色及官能基之影響。試材尺寸為 50 mm × 230 mm × 12 mm，總試驗日程為 28 天。

3. WPC 之回收再製

加速耐候試驗後之 WPC，以減型機進行粉碎處理，所得試材經 105°C 乾燥 24 hr 後，稱取所需之混料，均勻撒入成型模具中以抄製板坯。之後，續將板坯放入熱板溫度 200°C、壓力 2.5 MPa 的熱冷交替式平壓機中熱壓 8 min。當板坯中心溫度達 180°C 時，關閉加熱系統並開啟冷卻裝置，以常溫水冷卻循環 10 min，使其板坯中心溫度降至 100°C 後，解壓取出板材，並將板材靜置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中進行調濕處理。

4. WPC 之性質測定

(1) 理學及力學性質

原生 (Original) 及回收再製 (Recycled) 之 WPC，則依 CNS 2215 試驗標準分別測定其密度 (Density)、含水率 (Moisture content, MC)、吸水率 (Water absorption, WA)、吸水厚度膨脹率 (Thickness swelling, TS)、內聚強度 (Internal bond, IB)、木螺釘保持力 (Wood screw holding strength, WS)、抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 及抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)。

(2) 顏色變化

加速耐候試驗之試材表面顏色變化，是以 Minolta CM-3600d (Japan) 之分光式色差計進行

檢測，光源為 D_{65} ，測試窗直徑為 8 mm，視角為 10° 。檢測時，將試材直接置於測試窗上，並依國際照明協會制訂之 CIE LAB 色彩體系，測定試材之 L^* 、 a^* 及 b^* 值；其中， L^* 為明度，完全白之物體視為 100，完全黑之物體視為 0； a^* 為紅綠參數軸，正值愈大則表示顏色愈偏向紅色，負值愈大則愈偏向綠色； b^* 為黃藍參數軸，正值愈大表示顏色愈偏向黃色，負值愈大則愈偏向藍色。而 ΔE^* 為色差值，數值愈大表示顏色變化愈大。

(3) 表面官能基變化

加速耐候試驗之試材，利用 Bio-Rad FTS-3000 (USA) 傅立葉轉換紅外線光譜儀 (FTIR)，搭配全反射式附件 (Attenuated total reflectance, ATR)，測定試材表面官能基之變化。分析時所採用之解析度為 4 cm^{-1} ，掃描次數為 64 次，掃描波數 (Wavenumber) 範圍為 4000–400 cm^{-1} 。

5. WPC 木質粒片粒徑分析

本試驗參考 ASTM D2765 之試驗方法，利用二甲苯 (Xylene) 熱迴流方式溶解 WPC 中 HDPE，並將所得之木質粒片以篩分法 (Sieve analysis) 進行粒徑分析。

6. 統計分析

本試驗使用 SAS 統計軟體進行變異數分析 (Analysis of variance, ANOVA)，並透過 Scheffe 檢定 (Scheffe test) 評估各組間之差異 (信賴區間為 95%)。

III、結果與討論

(1) 加速耐候試驗對 WPC 顏色之影響

為了瞭解加速耐候期間 WPC 之表面顏色變化，本試驗利用色差計分析 QUV 加速耐候試驗期間，WPC 之表面顏色變化，其試驗結果如圖 1 所示。由圖中可以發現，WPC 之色差值 (ΔE^*) 隨加速耐候時間的增加而有上升之趨勢，於加速耐候 28 天時， ΔE^* 值為 7.1。同樣的，在影響 WPC 顏色變化之各參數中， L^* 、 a^* 及 b^* 等顏色參數亦隨著加速耐候時間增加而變化。其中，又以 L^* 值之變化幅度最大 ($\Delta L^* = 6.1$)，其次為 b^* 值 ($\Delta b^* = -3.3$)，而以 a^* 值的變化幅度最小 ($\Delta a^* = -1.5$)，此結果與 Lee 等人 (2012) 之試驗結果相似。Li (2000) 的研究指出，在 WPC 中，由於 HDPE 之

鍵解離能 (Bond dissociation energy) 較低 (C-H 的鍵解離能為 99 kcal/mol, 而 C-C 的鍵解離能為 83 kcal/mol), 因此 HDPE 容易受到 UV 的光劣化, 使得 C-H 及 C-C 的斷裂並產生自由基, 導致 HDPE 的降解及分子量的下降, 進而使 HDPE 變脆。同時, 由於 HDPE 之活化能僅為 23.2 kJ/mol, 在有氧且高溫之環境下 (68°C), 會造成 HDPE 的熱降解。而加速耐候試驗之過程, WPC 同樣處於高溫環境中 (黑板溫度為 50°C), 亦可能造成 HDPE 的降解, 因而造成 WPC 於耐候試驗過程易使表面顏色變淡。此外, Kiguchi 等人 (2007) 的研究報告指出, 在耐候試驗過程中, 木質材料中的木質素及半纖維素易受到光氧化降解, 其劣解產物受到水的淋洗作用後導致 WPC 的褪色。此外, 耐候試驗過程中, 木質粒片因吸收水分而膨脹, 造成 WPC 表面產生開裂; 同時, 表層塑膠因光氧化降解作用之影響, 造成塑膠分子產生斷鏈, 而此斷鏈的小分子因二次結晶作用 (Secondary crystallization), 使得塑膠基質緊縮而加劇複合材表面之開裂, 並致使 HDPE 由透明無色變成白色混濁狀, 而造成 WPC L^* 值變化 (Stark and Matuana, 2004; Hung *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2013)。

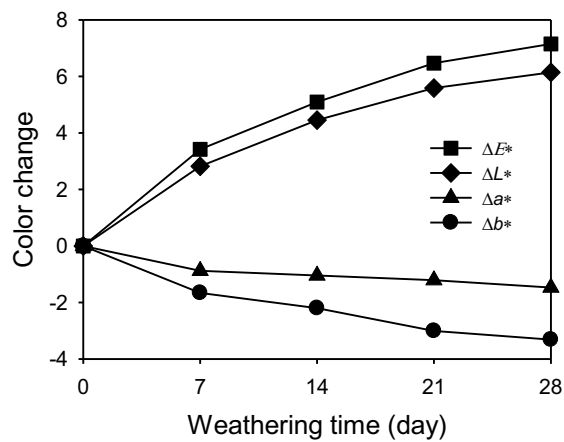


圖 1. 木材塑膠複合材經 28 天 QUV 加速耐候試驗後之顏色變化

Fig. 1. Color changes of WPC after QUV accelerated weathering for 28 days. Results are mean \pm SD ($n = 5$).

(II) 加速耐候試驗對 WPC 表面官能基之影響

另一方面, 為了瞭解加速耐候期間 WPC 之表面官能基變化, 本試驗利用 ATR-FTIR 進行分析, 其試驗結果如圖 2 所示。圖中 3329 cm^{-1} 為 O-H 之伸縮振動吸收峰, 2914 cm^{-1} 為 CH_2 之 C-H 伸縮振動吸收峰, 1735 cm^{-1} 為非共軛 C=O 之伸縮振動吸收峰, 1510 cm^{-1} 為木質素苯環之特性吸收峰, 1031 cm^{-1} 為纖維素及木質素 C-O 之伸縮振動吸收峰 (Feist and Hon, 1984; Stark and Matuana, 2007; Vane, 2003)。而根據 Stark 等人 (2004) 利用 ATR-FTIR 分析木材及 HDPE 之結果得知, 木材在波數 3329 cm^{-1} 、2914 cm^{-1} 、1444 cm^{-1} 及 1031 cm^{-1} 具有明顯的紅外線特性吸收; 相對的, HDPE 於 3329 cm^{-1} 及 1031 cm^{-1} 則無吸收, 但其 2914 cm^{-1} 及 1444 cm^{-1} 之吸收峰強度遠大於木材。因此, 在 WPC 中, 3329 cm^{-1} 及 1031 cm^{-1} 之吸收峰可視為木質粒片之吸收峰, 而 2914 cm^{-1} 及 1444 cm^{-1} 可視為 HDPE 之吸收峰。

由圖 2 中可以發現, 加速耐候試驗 7 天後, 3329 cm^{-1} 及 1031 cm^{-1} 之吸收峰相對強度增加, 計算 3329 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 及 1031 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 相對強度比值後發現 (表 1), 其加速耐候 7 天後之比值分別由加速耐候前之 0.14 及 0.41 增加至 0.25 及 0.77, 顯示經過加速耐候試驗 7 天後, WPC 表面之木質粒片相對含量增加。Stark 及 Matuana (2007) 發現, 耐候試驗前, WPC 表面主要由 HDPE 所組成, 並形成一平整光滑的平面。而耐候試驗後, 因為 HDPE 的光降解而產生裂痕, 再加上木質粒片吸水膨脹, 進而造成 WPC 表面之木質粒片裸露。而隨著加速耐候試驗時間持續增加, 3329 cm^{-1} 及 1031 cm^{-1} 之吸收峰相對強度逐漸減弱, 計算 3329 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 及 1031 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 之相對強度比值後發現, 其加速耐候 28 天後之比值分別由加速耐候 7 天之 0.41 及 0.77 下降至 0.11 及 0.30, 顯示經過加速耐候試驗 28 天後, WPC 表面之木質粒片相對含量較少。WPC 在加速耐候試驗過程中, HDPE 包覆之木質粒片收縮膨脹, 使二者之界面間形成裂縫, 並造成木質粒片的破壞。而被破壞的木質粒片則進一步因表面凝結水分的淋洗, 進而造成 3329 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 及 1031 $\text{cm}^{-1}/2914 \text{cm}^{-1}$ 之相對強度比值下降 (Stark and Matuana, 2007)。然而, 許多研究報告指出, 木質材料中木質素會吸收 UV 光, 造成木質素的氧化而降解, 而

使紅外線光譜中 1510 cm^{-1} 及 1600 cm^{-1} 木質素苯環特定吸收峰之相對強度下降；相反的， 1735 cm^{-1} 羰基吸收峰的相對強度則增加 (Feist and Hon, 1984; Williams, 2005)；而本試驗之 WPC 經加速耐候 7 天後，亦呈現相同趨勢 (圖 2、表 1)。然而隨著加速耐候試驗時間持續增加，其 1735 cm^{-1} 的相對強度則呈現下降之趨勢。此結果則與 Stark 及 Matuana (2007) 利用高密度聚乙烯與木粉製備 WPC，經氬弧燈照射 3000 hr 所得結果相似。造成此現象之原因可能係因為在加速耐候試驗過程中，由於 WPC 表面之木質粒片之劣解產物受表面凝結水分的淋洗，因而造成 WPC 表面之木質粒片劣解成分流失，故無法自紅外線光譜中發現木質素苯環特定吸收峰之相對強度下降，以及羰基吸收峰的相對強度增加。

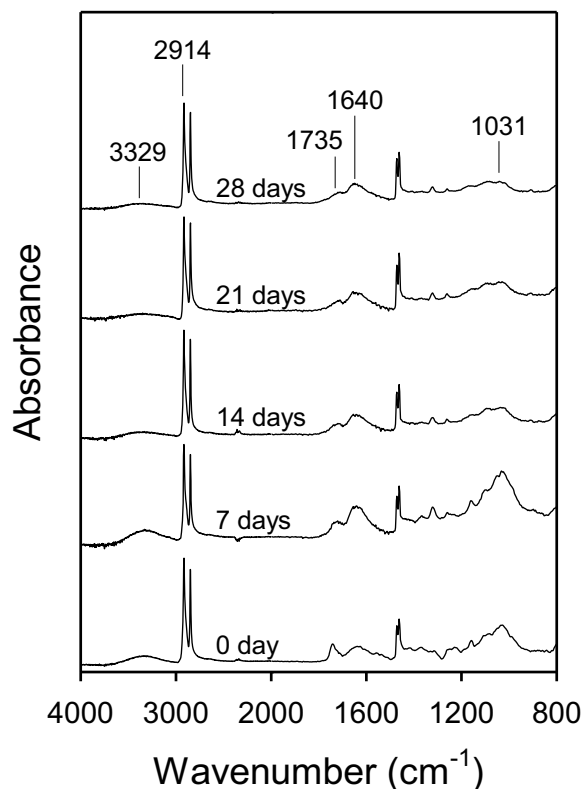


圖 2. 木材塑膠複合材經 28 天 QUV 加速耐候試驗後之紅外線光譜

Fig. 2. Infrared spectra of WPC after QUV accelerated weathering for 28 days.

(III) 回收再製對 WPC 理學及力學性質之影響

經 QUV 加速耐候試驗 28 天後之 WPC，先以減型機進行粉碎處理後，續將此回收試材直接回收再製成 WPC，並測定其各項理學及力學性質。而為瞭解回收再製對 WPC 中木質粒片尺寸之影響，本試驗利用二甲苯 (Xylene) 熱迴流方式溶解 WPC 中 HDPE，並將所得之木質粒片進行粒徑分析，其所得之結果如圖 3 所示。由圖中可以發現，原生 WPC 之粒徑介於 -8+20 mesh 者占 58.1%、介於 -20+40 mesh 者占 28.1%、介於 -40+60 mesh 者占 8.2%、介於 -60+100 mesh 者占 4.1%，而 -100 mesh 者則占 1.5%；相對的，回收再製之 WPC 粒徑介於 -8+20 mesh 者占 31.4%、介於 -20+40 mesh 者占 28.2%、介於 -40+60 mesh 者占 16.1%、介於 -60+100 mesh 者占 13.2%，而 -100 mesh 者則占 11.1%。此結果顯示，經回收再製而成之 WPC，其組成木質粒片之粒徑較原生複合材中之木質粒片小。由此得知 WPC 於回收再製過程中，除造成塑膠基質的破碎外，亦會切斷複合材中之木質粒片，使得其尺寸變小。

表 2 為回收再製之 WPC 之理學性質，由表中可以得知，經 28 天的加速耐候試驗並回收再製而成之 WPC，其密度較原生複合材略高。複合材製造時，原生及回收再製兩者之預設密度均為 900 kg/m^3 ，厚度則為 12 mm。而在原生複合材製造時，HDPE 受熱溶流所造成木質粒片/HDPE 混合物之流失率較高，且原生複合材之成板厚度亦較預設厚度略高；相反的，回收再製者則無上述現象，因而導致原生與回收再製複合材之密度差異。而由於回收再製之 WPC 與原生複合材之密度有統計上之差異，因此在後續力學性質的表現上則以比強度 (Specific strength) 方式表示。此外，回收再製之 WPC 之含水率亦較原生複合材略高，但僅相差約 1%。而在吸水率及吸水厚度膨脹率方面，回收再製之 WPC 均與原生複合材之性質相似，經統計分析後發現，其組間並無顯著差異。而在力學性質方面，由圖 4 中可以發現，回收再製之 WPC 之比抗彎強度 (sMOR) 及比抗彎彈性模數 (sMOE) 均較原生複合材略低，其強度值分別由 10.9 MPa 與 0.97 GPa 下降為 9.8 MPa 及 0.80 GPa。推測造成此現象之原因，主要是因為回收再製時造成木質粒片尺寸變小所致。研究報告指出，WPC 中所含之木質粒片尺寸愈大，其抗彎強度亦愈大；反

表 1. QUV 加速耐候期間木材塑膠複合材紅外線吸收峰之相對強度

Table 1. Relative intensity of ATR-FTIR absorption peaks of WPC during QUV accelerated weathering

Relative intensity	Weathering time (day)				
	0	7	14	21	28
3329 cm ⁻¹ /2914 cm ⁻¹	0.14	0.25	0.11	0.15	0.11
1735 cm ⁻¹ /2914 cm ⁻¹	0.23	0.32	0.17	0.25	0.20
1510 cm ⁻¹ /2914 cm ⁻¹	0.13	0.23	0.12	0.19	0.16
1031 cm ⁻¹ /2914 cm ⁻¹	0.41	0.77	0.32	0.43	0.30

表 2. 原生及回收再製木材塑膠複合材之理學性質

Table 2. Physical properties of original and recycled WPCs

WPC	Density (kg/m ³)	MC (%)	WA (%)	TS (%)
Original	800 ± 21 ^B	1.2 ± 0.1 ^B	18.9 ± 4.6 ^A	3.6 ± 0.4 ^A
Recycled	902 ± 19 ^A	2.1 ± 0.4 ^A	21.2 ± 7.3 ^A	3.4 ± 0.5 ^A

Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters in superscript indicate significant differences among groups ($p < 0.05$).

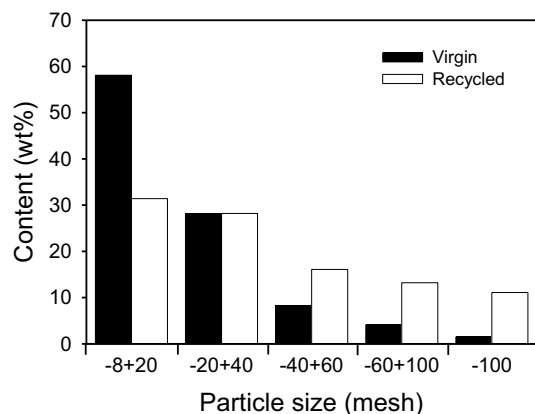


圖 3. 原生及回收再製木材塑膠複合材中木質粒片之粒徑分布

Fig. 3. Distributions of wood particle size in original and recycled WPCs.

之，木質粒片尺寸愈小則抗彎強度愈弱 (Bouafif *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2006; Migneault *et al.*, 2009)。而由圖 5 中可以發現，回收再製之 WPC，其比內聚力 (sIB) 與原生複合材相近，均介於 1.6–1.7 MPa 之間。此結果顯示，28 天人工加速耐候試驗及回收再製並不會造成 WPC 內聚強度的改變。此外，由圖 5 亦可發現，回收再製之 WPC 比

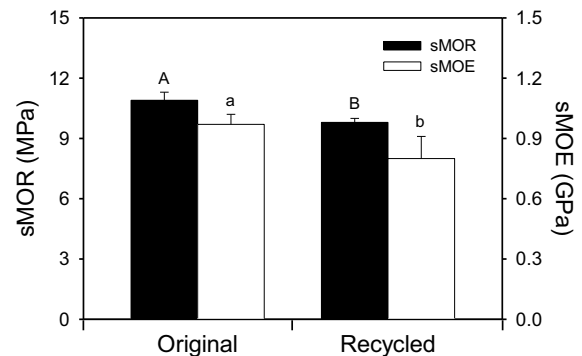


圖 4. 原生及回收再製木材塑膠複合材之比抗彎強度及比抗彎彈性模數

Fig. 4. sMOR and sMOE of original and recycled WPCs. Results are mean ± SD ($n = 5$). Bars with different letters indicate significant differences among groups ($p < 0.05$).

木螺釘保持力 (sWS) 明顯提升，其平均值由原先的 0.76 kN 增加為 0.90 kN。

綜合上述結果得知，WPC 經加速耐候及回收再製雖會造成木質粒片尺寸變小，因而造成抗彎強度及抗彎彈性模數略為下降，但影響幅度不大；相反的，回收再製而成之 WPC，其比木螺釘保持力更較原生複合材高。

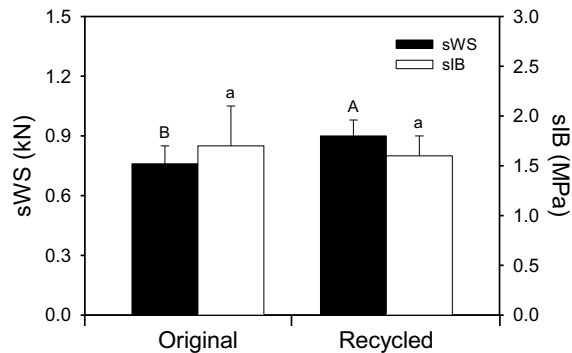


圖 5. 原生及回收再製木材塑膠複合材之比木螺釘保持力及比內聚強度

Fig. 5. sWS and sIB of original and recycled WPCs. Results are mean \pm SD ($n = 5$). Bars with different letters indicate significant differences among groups ($p < 0.05$).

IV、結論

WPC 發展至今已有數十年的歷史，而相關的研究報告多著重於最適化的製程與配比、耐腐朽性及耐候性等，鮮少探討廢棄複合材多次回收再利用的問題。本研究利用太空包木質粒片與高密度聚乙烯，以重量混合比 60/40 (w/w) 製備 WPC，除評估耐候試驗過程中試材表面之顏色及官能基之變化外，並將耐候試驗後之複合材粉碎處理並直接抄製成回收再製 WPC，以探討 WPC 回收再製之可行性。試驗結果顯示，耐候試驗初期，複合材 1031 cm^{-1} 木質粒片特性吸收峰及 1735 cm^{-1} 羰基吸收峰之相對強度增加，而隨著耐候時間持續增加，其相對強度質逐漸下降，且複合材表面顏色逐漸變淡。此外，WPC 經回收再製後，會造成複合材中木質粒片尺寸變小，其密度及含水率較原生複合材略高，而吸水率及吸水厚度膨脹率則無明顯之變化。在力學性質方面，WPC 經回收再製後，其比抗彎強度與比抗彎彈性模數略低於原生複合材，比內聚強度則無統計上的差異，而比木螺釘保持力則較原生複合材高。綜合以上結果得知，以物理性回收再製 WPC 係一可行之方法，其不僅能減少資源之浪費及環境的衝擊外，亦能延長複合材之生命週期，以達到節能減碳之效益。然而，本試驗僅進行單次回收再製，而多次回收再製恐會加劇強度性能之下降程度。因

此，如何改善此一問題則係下一階段需進行的研究課題。

V、參考文獻

1. 楊紹榮、黃瑞彰 (2002) 生物分解 PP 太空包在食用菇類栽培之研究。台南區農業改良場研究彙報 40: 55-66。
2. 蔡宜峰 (1994) 菇類太空包廢料堆肥化製作之研究。台中區農業改良場研究彙報 44: 13-21。
3. Ashori, A. and A. Nourbakhsh (2009) Effects of post heat-treatment on surface characteristics and adhesive bonding performance of medium density fiberboard. *Mater. Manuf. Process.* 24:594-599.
4. Bouafif, H., A. Koubaa, P. Perré and A. Cloutier (2009) Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 40:1975-1981.
5. Chen, H. C., T. Y. Chen and C. H. Hsu (2006) Effects of particle size and mixing ratios of HDPE on the Properties of the Composites. *Holz Roh Werkst.* 64:172-177.
6. Chen, Y.-L., C.-Y. Lin, T.-L. Wu, M.-J. Chung, T.-Y. Chen, T.-H. Yang, H.-C. Chen and J.-H. Wu (2012) Evaluation and application of the invasive weed *Mikania micrantha* as an alternative reinforcement in recycled high density polyethylene. *BioResources* 7:2403-2417.
7. Feist, W. C. and D. N. S. Hon (1984) Chemistry of weathering and protection. In: Rowell, R. (ed) *The Chemistry of Solid Wood*. American Chemical Society, Washington DC, pp. 401-541.
8. Gosselin, R., D. Rodrigue and C. Duchesne (2011) A hyperspectral imaging sensor for on-line quality control of extruded polymer composite products. *Comput. Chme. Eng.* 35:296-306.
9. Hiyama, R., S. Gisusi and A. Harada (2013) Effect of increased harvests on saccharification

- ratio of waste mushroom medium from the cultivation of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *J. Wood Sci.* 59:88–93.
10. Hung, K.-C. and J.-H. Wu (2010) Mechanical and interfacial properties of plastic composite panels made from esterified bamboo particles. *J. Wood Sci.* 56:216–221.
 11. Hung, K.-C., Y.-L. Chen and J.-H. Wu (2012) Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. *Polym. Degrad. Stabil.* 97:1680–1685.
 12. Kiguchi, M., Y. Kataoka, H. Matsunaga, K. Yamamoto and P. D. Evans (2007) Surface deterioration of wood-flour polypropylene composites by weathering trials. *J. Wood Sci.* 53:234–238.
 13. Lee, C.-H., K.-C. Hung, Y.-L. Chen, T.-L. Wu, Y.-C. Chien and J.-H. Wu (2012) Effects of polymeric matrix on accelerated UV weathering properties of wood-plastic composites. *Holzforschung* 66:981–987.
 14. Lei, Y. and Q. Wu (2010) Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly(ethylene terephthalate). *Bioresour. Technol.* 101:3665–3671.
 15. Leu, S.-Y., T.-H. Yang, S.-F. Lo and T.-H. Yang (2012) Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs). *Constr. Build. Mater.* 29:120–127.
 16. Li, R. (2000) Environmental degradation of wood-HDPE composite. *Polym. Degrad. Stabil.* 70:135–145.
 17. Mantia, F. P. and M. Morreale (2011) Green composites: A brief review. *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 42:579–588.
 18. Migneault, S., A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaaia, K. Englund and M. P. Wolcott (2009) Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 40:80–85.
 19. Smith, P. (2001) U. S. Woodfiber-plastic composite decking market. In proceedings for the Sixth International Conference on woodfiber-plastic composites. Forest Products Society, Madison, WI. pp. 13–17.
 20. Stark, N. M. and L. M. Matuana (2004) Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering. *J. Appl. Polym. Sci.* 94:2263–2273.
 21. Stark, N. M. and L. M. Matuana (2007) Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. *Polym. Degrad. Stabil.* 92:1883–1890.
 22. Stark, N. M., L. M. Matuana and C. M. Clemons (2004) Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 93:1021–1030.
 23. Vane, C. H. (2003) Monitoring decay of black gum wood (*Nyssa sylvatica*) during growth of the shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using diffuse reflectance infrared spectroscopy. *Appl. Spectrosc.* 57:514–517.
 24. Williams, R. S. (2005) Weathering of wood. In: Rowell, R. M. (eds) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, Florida, pp. 121–138.
 25. Winandy, J. E., N. M. Stark, and C. M. Clemons (2004) Considerations in recycling of wood-plastic composites. In proceedings for the 5th Global Wood and Natural Fiber Composites Symposium. pp. A6-1–A6-9.
 26. Wu, T.-L., Y.-C. Chien, T.-Y. Chen and J.-H. Wu (2013) The influence of hot-press temperature and cooling rate on thermal and physicomechanical properties of bamboo particle-polyactic acid composites. *Holzforschung* 67:325–331.