

成型方式對聚苯乙烯系木材塑膠複合材料 性質之影響

吳東霖¹ 洪克昌² 吳志鴻^{3*}

【摘要】本研究利用杉木粒片、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚合物 (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) 以及回收型聚苯乙烯 (Recycled polystyrene, rPS) 為材料，透過熱壓成型及射出成型二種方式製備不同 ABS 及 rPS 比例之聚苯乙烯系木材塑膠複合材料 (Wood plastic composite, WPC)，並利用萬能強度試驗機及動態機械分析儀 (Dynamic mechanical analyzer, DMA) 等儀器，探討其對複合材料物理機械及黏彈性質之影響。試驗結果顯示，不同 ABS 及 rPS 配比對 WPC 之含水率無顯著影響，但射出成型複合材料之含水率較熱壓成型者為低。另外，機械性質方面，添加杉木粒片能有效提高 ABS 及 rPS 之抗彎及抗拉彈性模數，但會降低其破壞伸長率。再者，熱壓成型複合材之抗彎及抗拉強度均隨 rPS 比例提高而降低，至 rPS 含量達 30% 後則無顯著差異；而射出成型複合材料之抗彎及抗拉性質均較熱壓成型者佳。至於衝擊強度方面，添加木粒片會降低純 ABS 之衝擊強度，對 rPS 則無顯著影響。此外，DMA 之試驗結果顯示，複合材料之儲存模數均較純塑膠材料為高。然而，射出成型複合材之玻璃轉移溫度 (Glass transition temperature, T_g) 較純塑膠材料為低；相對的，熱壓成型者則與純塑膠材料相似。

【關鍵詞】熱壓成型、射出成型、物理機械性質、聚苯乙烯系木材塑膠複合材料、黏彈性質。

Effects of Molding Processes on the Properties of Polystyrene-based Wood-Plastic Composites

Tung-Lin Wu¹ Ke-Chang Hung² Jyh-Horng Wu^{3*}

【Abstract】In this study, China fir (*Cunninghamia lanceolata*) particles, acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), and recycled polystyrene (rPS) were used as raw materials to manufacture polystyrene-based wood-plastic composite (WPC) by hot compression molding and injection molding. Effects of ABS/rPS ratio and molding process on the physicochemical and viscoelastic properties of WPC were evaluated by universal testing machine and dynamic mechanical analyzer (DMA). The experimental results showed that the ABS/rPS ratio has no significant effect on the moisture content of WPC. However, the moisture content of WPC manufactured by injection molding was lower than that by hot compression molding. In addition, the modulus of elasticity and tensile modulus were significantly enhanced when the ABS and rPS reinforced with China fir particle, but the elongation at break of the composite was reduced. Moreover, the modulus of rupture and tensile strength of WPC manufactured by hot compression molding decreased with increasing the rPS content, while no significant difference was found when the rPS content exceeded 30%. Meanwhile, the flexural and tensile properties of WPC manufactured by injection molding were better than those by hot compression molding. On the other hand, adding the China fir particles into the plastic materials,

¹ 南開科技大學休閒事業管理系兼任助理教授。40227 台中市南區興大路 145 號。

Adjunct Assistant Professor, Department of Leisure Business Management, Nan Kai University of Technology, 145, Xingda Rd., South Dist., Taichung, 40227, Taiwan.

² 國立中興大學森林學系博士後研究員。40227 台中市南區興大路 145 號。

Postdoctoral Fellow, Department of Forestry, National Chung Hsing University, 145, Xingda Rd., South Dist., Taichung, 40227, Taiwan.

^{3*} 國立中興大學森林學系教授，通訊作者。40227 台中市南區興大路 145 號。

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University, 145, Xingda Rd., South Dist., Taichung, 40227, Taiwan.

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

which reduced the impact strength of ABS, but had no significant effect on rPS. According to the results of the DMA, the storage modulus of WPC was higher than that of neat ABS and neat rPS. However, the glass transition temperature (T_g) of injection-molded WPC was lower than that of neat plastic materials. In contrast, the T_g of compression-molded WPC was similar to the neat plastic materials.

【Key words】 Hot compression molding, Injection molding, Physicomechanical property, Polystyrene-based wood-plastic composite, Viscoelastic property.

I、前言

木材塑膠複合材料 (Wood-plastic composite · WPC) 因具有塑膠和木材兩種材料之優點，同時並可改善二種材料各自缺點之特性，故為近年來發展性最高的林產加工利用方法之一(Ashori, 2008 ; 吳志鴻, 2009 ; Lee *et al.*, 2010 ; Chen *et al.*, 2012 ; Yang *et al.*, 2015)。一般而言，常用於製備 WPC 之熱可塑性塑膠種類，主要有高密度聚乙烯 (High density polyethylene · HDPE)、低密度聚乙烯 (Low density polyethylene · LDPE)、聚丙稀 (Polypropylene · PP)、聚苯乙烯 (Polystyrene · PS) 以及聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride · PVC) 等 (Stark *et al.*, 2003 ; García *et al.*, 2009)。然而，此類化石工業所生產之高分子材料具有不易自然分解之特性，導致其廢棄後造成嚴重的環境污染問題 (Bonhomme *et al.*, 2003)。因此，在自然資源短缺以及全球環保意識高漲下，若能將塑膠回收再利用，必能減少資源浪費及環境污染之問題。聚苯乙烯是無色透明之熱塑性塑料，具有高於 100°C 的玻璃轉移溫度，因此經常用來製作各種需要承受開水溫度的免洗容器，以及免洗餐盒等。另外，在聚苯乙烯中添加聚丁基橡膠顆粒可製備出耐衝擊性聚苯乙烯，此產品受到衝擊時，會因橡膠顆粒的裂紋擴展使應力釋放，進而提高材料的抗衝擊性質 (Maldas and Kokta, 1989)。因此，若以回收型聚苯乙烯 (Recycled polystyrene · rPS) 作為複合材料之基質，再與木質殘料製備木材塑膠複合材料，不僅可達「節能減廢」及「資材再利用」之效，並可降低塑膠材料對環境所造成之危害。

另一方面，依產品需求、屬性及用途的不同，WPC 之製造方式亦有所差異。而常見之 WPC 成型方式主要可分為擠出成型 (Extruder molding)、射出成型 (Injection molding) 以及熱壓成型 (Hot compression molding) 等 (Stark and Matuana, 2004)。

然而，不同成型方式不僅會影響 WPC 製品之外觀，亦會影響其物理機械性質之表現。例如：以射出成型法製備纖維/聚丙烯複合材料時，複合材料會有殼核型態 (Skin-core morphology) 出現，即心層之纖維排列方向會與流體之方向垂直，而表層之纖維則與流體射出方向呈平行排列。同時，複合材料心層部分之纖維含量較表層多，而表層則具有較高含量之塑膠基質 (Clemons *et al.*, 1999)。相對的，以熱壓成型及擠出成型方式所製備之 WPC 則表面較不平整，且纖維之排列較無方向性。而此差異除了會影響 WPC 之物理及機械性質外，亦會影響其耐候及耐腐朽等性質 (Migneault *et al.*, 2009)。再者，木材與塑膠間之孔隙易使木材於吸脫濕之過程中，產生收縮膨脹，進而破壞木材與塑膠間之界面性質。此外，由於擠出成型之 WPC 經裁切後，表面具有較多孔隙及裸露之木材纖維，故提高水分滲透至 WPC 內部之機會，使 WPC 具有較高吸水率及吸水厚度膨脹率。相對的，射出成型所製備之 WPC，其具有較高塑膠含量之平滑表面，故可降低試材之吸水性及厚度膨脹率，顯示以射出成型所製備之 WPC 具有較佳之尺寸安定性 (Clemons and Ibach, 2004 ; Migneault *et al.*, 2009)。

此外，抗彎強度 (Modulus of rupture · MOR) 及抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity · MOE) 為評估木質材料及木質複合材料強度性質之重要指標之一。由於以射出成型方式製備 WPC 時所需壓力較大，故塑膠較能完整包覆木材，進而提升二者間之界面膠合性質。因此，於強度試驗過程中，應力較能有效自塑膠轉移至木材，使得射出成型 WPC 之強度均較擠出成型者高出約 20-40% (Stark and Matuana, 2004)。再者，以熱壓成型方式製備 WPC 時，除了能設計較大面積之複合材料，供裁切成不同尺寸之板材，以作為室內裝潢材料之用途外，其熱壓時間及模具所消耗之能量及成本亦較低。同時，早期已有許多探討射出成型及擠出成型

方式所製備 WPC 之性質差異之相關研究，均指出射出成型者具有較佳之抗彎性質及尺寸安定性 (Clemons and Ibach, 2004; Stark and Matuana, 2004; Migneault *et al.*, 2009)。然而，針對以熱壓成型法及射出成型法所製備聚苯乙烯系 WPC 之性質比較，鮮少有相關研究。因此，本試驗以熱壓成型法及射出成型法進行聚苯乙烯系 WPC 之製備，除了評估複合材料物理機械性質之外，並進一步探討 WPC 之動態機械性質，以期瞭解成型方式對聚苯乙烯系 WPC 之性質影響。

II、材料與方法

(I) 試驗材料

1. 木質粒片

本試驗所使用之木質材料，取自中興大學惠孫實驗林場之杉木 (*Cunninghamia lanceolata*, China fir)。經過搗切機 (Hog) 及磨切機 (Flaker) 製成粒片後，隨即將所製得之杉木粒片置於 105°C 烘箱中乾燥 24 h 後，續以篩分機對粒片進行篩分，並選取粒徑為 -24+30 mesh 之杉木粒片進行後續複合材料之製備。

2. 塑膠材料

本試驗所使用之塑膠材料為回收型聚苯乙烯 (rPS)，購自於樹德企業股份有限公司，以及丙烯酸腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚合物 (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)，購自台灣化學纖維股份

有限公司，型號為 AG15A2，密度為 1050 kg/m³，而熔流指數為 1.7 g/10 min。

(II) 木材塑膠複合材料之製備

本試驗中 WPC 之製備係固定複合材料中杉木粒片與塑膠之整體比例 (杉木粒片 / 塑膠 = 30/70 wt%)，改變複合材塑膠基質中 ABS 及 rPS 之比例，以探討不同 ABS 及 rPS 之比例對 WPC 性質之影響，其各組 WPC 之組成如表 1 所示。製備時，依表中原料配比，秤取所需重量之絕乾杉木粒片、ABS 以及 rPS，於溫度 150°C 及轉速 45 rpm 下混鍊 5 min 後造粒，以供後續複合材料製備之用。複合材製備時，分別以熱壓成型及射出成型等二種方式進行，其製備條件如下：

1. 熱壓成型

本試驗中，板材預設密度為 1100 kg/m³，成板尺寸為 200 mm × 300 mm × 3 mm。製備時，秤取所需重量之造粒材料，將其均勻撒入成型模具抄製成板坯後，置入熱壓機中，熱壓溫度為 150°C，於壓力 2.5 MPa 下進行熱壓。經 4 min 熱壓後，再將板坯置於冷壓機中進行冷卻，經 10 min 冷卻時間後，即完成板材之製備。成板後，將 WPC 依相關檢測標準進行後續各項性質分析。

2. 射出成型

本試驗中，將造粒後之材料，以射出成型機 (HWA CHIN, HC-160SE) 製備 WPC 抗彎性質、抗拉性質以及衝擊強度等試驗標準試片。射出成

表 1 各組木材塑膠複合材料之組成

Table 1 Compositions of various wood-plastic composites

Specimens	Wood (wt%)	rPS (wt%)	ABS (wt%)
Neat ABS	0	0	100
Neat rPS	0	100	0
W3P0A7	30	0	70
W3P1A6	30	10	60
W3P2A5	30	20	50
W3P3A4	30	30	40
W3P4A3	30	40	30
W3P5A2	30	50	20
W3P6A1	30	60	10
W3P7A0	30	70	0

型機各階段溫度設定分別為 195、190、185 以及 170°C，並於壓力 3.5 MPa 之條件下進行射出成型。之後，經冷卻程序即完成 WPC 之製備。試片成型後，依相關檢測標準進行後續各項性質分析。

(III) 性質分析

1. 密度

本試驗參考 CNS 15730 (2014) 木材-塑膠之再生複合材檢測標準，將試材裁切成 50 mm × 50 mm × 3 mm 之試片後，置於 20°C、65% RH 之環境調整 7 天，測量試片之長度、寬度、厚度以及質量，並依此計算試片密度。

2. 含水率

本試驗參考 CNS 15730 (2014) 木材-塑膠之再生複合材檢測標準，將試材裁切成 50 mm × 50 mm × 3 mm 之試片後，置於 20°C、65% RH 之環境調整 7 天，測定試片之質量。接著，將其置入 105°C 烘箱內乾燥至恆重，測定其乾燥後之絕乾質量，並依此計算含水率。

3. 抗彎強度與抗彎彈性模數

本試驗參考 CNS 15730 (2014) 木材-塑膠之再生複合材檢測標準，將試材裁切成 58 mm × 12.7 mm × 3 mm 之試片，並置於 20°C、65% RH 之環境中調整 7 天後，測量試片之長度、寬度、厚度及重量。之後，以 1.28 mm/min 之載重速度及跨距為 48 mm 之試驗條件進行檢測。紀錄試片之最大載重值及其經時載重與變形量，依此計算試片之抗彎強度 (MOR) 及抗彎彈性模數 (MOE)。

$$\text{MOR (MPa)} = 3PL/2bh^2$$

$$\text{MOE (MPa)} = \Delta PL^3/4\Delta Ybh^3$$

式中，P 為最大載重 (N)、L 為跨距 (mm)、b 為試片寬度 (mm)、h 為試片厚度 (mm)、 ΔP 為比例限度內上限載重值及下限載重值之差 (N)、 ΔY 為 ΔP 相對應之跨距中央之彎曲變形量 (mm)。

4. 抗拉強度 (Tensile strength)、抗拉彈性模數 (Tensile modulus) 以及破壞伸長率 (Elongation at break)

本試驗參考 ASTM D 638-08 之檢測標準，將試材裁切成 165 mm × 19 mm × 3 mm 之啞鈴型試片 (Type I) 後，置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中調濕 7 天後，測量試片之寬度及厚度。之

後，以載重速度 5 mm/min 進行檢測，記錄試片之最大載重值、經時載重值與變形量以及破壞時之伸長量，並依下列公式計算試片之抗拉強度、抗拉彈性模數及破壞伸長率。

$$\text{Tensile strength (MPa)} = P/bh$$

$$\text{Tensile modulus (MPa)} = \Delta PL/\Delta Ybh$$

$$\text{Elongation at break (\%)} = (B/L) \times 100$$

式中，P 為最大載重 (N)、b 為試片寬度 (mm)、h 為試片厚度 (mm)、L 為試片狹窄處之長度 (50 mm)、 ΔP 為比例限度內上限載重值及下限載重值之差 (N)、 ΔY 為與 ΔP 相對應之形變量 (mm)、B 為試片破壞時之伸長量 (mm)。

5. 衝擊強度 (Impact strength)

本試驗參考 ASTM D 256-10 之檢測標準，將試材裁切成 63.5 mm × 12.7 mm × 3 mm 之刻溝 (Notched) 試片後，置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中調濕 7 天後，測量試片之寬度及厚度。之後，以 Charpy 衝擊強度試驗機 (Yasuda, Japan) 進行檢測，並依下列公式計算試片之衝擊強度。

$$E (J) = WR (\cos\beta - \cos\alpha)$$

$$\text{衝擊強度 (kJ/m}^2 \text{)} = E/A$$

式中，E 為衝擊試驗機所吸收之能量、W 為擺錘質量 (8.1152 N)、R 為擺錘之迴轉中心至其重心間的距離 (0.3217 m)、 α 為落下的角度 (150°)、 β 為擊斷試片後擺錘之上升角度、A 為試片斷面積 (m²)。

6. 動態機械性質

本試驗以 PerkinElmer DMA-8000 動態機械分析儀 (Dynamic mechanical analyzer, DMA) 進行分析。試驗時，採單懸臂 (Single cantilever) 彎曲試驗模式，升溫速率為 2°C/min，頻率為 1 Hz，溫度範圍則為 30-140°C。

(IV) 統計分析

本試驗使用 SAS 統計系統進行變異數分析 (Analysis of variance, ANOVA)，並透過 Scheffe 檢定 (Scheffe test) 或學生式 T 檢定法 (Student's t-test) 評估各組間之差異性，分析時所使用之信賴區間為 95%。

III、結果與討論

(I) 不同 ABS 及 rPS 比例所製備木材塑膠複合材料之物理性質

為了瞭解不同比例之 ABS 及 rPS 以及成型方式對 WPC 性質之影響，本試驗固定複合材料中杉木粒片與塑膠之整體比例(杉木粒片/塑膠 = 30/70 wt%)，改變塑膠中 ABS 及 rPS 之比例，並分別以熱壓成型及射出成型製備複合材料。其中，各組複合材之密度及含水率如表 2 所示。由表中可以發現，熱壓成型所製備之 WPC 密度介於 1084–1114 kg/m³，其值較純 ABS (1008 kg/m³) 及純 rPS (989 kg/m³) 為高。而以射出成型法所製備之 WPC 密度則介於 1097–1120 kg/m³，此值亦較射出成型製備之純 ABS (1013 kg/m³) 及純 rPS (1043 kg/m³) 試材為高。綜合上述試驗結果可以得知，二種製程方式所製備 WPC 之密度雖然有所差異，但其值均與預設密度 (1100 kg/m³) 相近，顯示於不同成型方式及配比下所製備之 WPC 均符合預設密度。另一方面，由表中試材含水率之試驗結果可以發現，二種成型方式所製備之純 ABS 及純 rPS 試材之含水率均趨近於 0。而添加杉木粒片後，不論是熱壓成型或射出成型所製備之 WPC，其含水率均顯著提

高，其值分別介於 2.0–2.7% 及 1.2–1.7%。造成此現象之原因，主要係木粒片為親水性材料，故以其取代疏水性塑膠時，即提高複合材料之親水性所致。此外，比較熱壓成型及射出成型製備之複合材料可以發現，以射出成型法所製備之複合材料含水率較低，此試驗結果與 Clemons 及 Ibach (2004) 以及 Migneault 等人 (2009) 之試驗結果相似，均顯示射出成型所製備之複合材料具有較高之疏水性。而造成此現象之原因，主要係以射出成型法製備複合材料時，複合材料表面具有較高之塑膠含量，故複合材表面較為平滑且對木粒片之包覆性較佳，進而降低水分與木粒片接觸及滲透到複合材內部之機會所致。相對的，以熱壓成型方式製備者，需裁切成試驗所需試片，導致試材表面具有較多孔隙及木粒片裸露，使水分可藉此擴散至複合材內部，故其含水率相對較高。

(II) 不同 ABS 及 rPS 比例所製備木材塑膠複合材料之機械性質

為了探討不同比例之 ABS 及 rPS 對 WPC 機械性質之影響，本研究針對試材之抗彎強度、抗拉強度以及衝擊強度等機械性質進行試驗。其中，抗彎性質及抗拉性質均為常用以評估複合材料機械

表 2 以熱壓成型及射出成型方式製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之密度及含水率

Table 2 Density and moisture content of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by hot compression and injection moldings

Specimens	Hot compression molding		Injection molding	
	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)
Neat ABS	1008 ± 14 ^b	0.41 ± 0.01 ^c	1013 ± 2 ^f	0.37 ± 0.01 ^{d**}
Neat rPS	989 ± 13 ^b	0.18 ± 0.01 ^f	1043 ± 3 ^{e**}	0.13 ± 0.01 ^{e**}
W3P0A7	1114 ± 9 ^a	2.69 ± 0.03 ^a	1104 ± 1 ^{bcd}	1.73 ± 0.04 ^{a**}
W3P1A6	1101 ± 16 ^a	2.68 ± 0.02 ^a	1116 ± 3 ^{ab}	1.46 ± 0.06 ^{b**}
W3P2A5	1103 ± 12 ^a	2.58 ± 0.06 ^{ab}	1116 ± 3 ^{ab}	1.31 ± 0.06 ^{bc**}
W3P3A4	1088 ± 8 ^a	2.65 ± 0.03 ^a	1120 ± 1 ^{a**}	1.38 ± 0.06 ^{b**}
W3P4A3	1097 ± 13 ^a	2.51 ± 0.07 ^{bc}	1118 ± 2 ^{a*}	1.36 ± 0.06 ^{b**}
W3P5A2	1089 ± 6 ^a	2.06 ± 0.03 ^d	1097 ± 2 ^{d*}	1.19 ± 0.08 ^{c**}
W3P6A1	1099 ± 9 ^a	2.42 ± 0.03 ^c	1110 ± 3 ^{abc*}	1.41 ± 0.09 ^{b**}
W3P7A0	1084 ± 13 ^a	2.03 ± 0.04 ^d	1101 ± 13 ^{cd}	1.42 ± 0.07 ^{b**}

Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant differences among groups ($p < 0.05$). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; compared with hot compression molding.

性質優劣之重要依據。而由圖 1A 熱壓成型試材之抗彎性質可以發現，於 ABS 塑膠材料中添加 30% 木粒片 (W3P0A7) 時，ABS 之 MOR 由 64.3 MPa 降低至 57.0 MPa，而 MOE 則由 2.5 GPa 上升至 3.8 GPa。然而，比較純 rPS 及其添加 30% 木粒片之複合材 (W3P7A0) 時可以發現，其 MOR 及 MOE 分別由 43.4 MPa 及 3.1 GPa 提高至 45.7 MPa 及 4.2 GPa。由此可以得知，添加 30% 木粒片能有效提升 ABS 及 rPS 之抗彎彈性模數，但對抗彎強度則無顯著影響。另外，比較不同 ABS 及 rPS 比例所製備之 WPC 抗彎性質可以發現，複合材中 rPS 之添加量由 0% (W3P0A7) 增加至 20% (W3P2A5) 時，其 MOR 隨之由 57.0 MPa 下降到 42.3 MPa，其後則無顯著影響；相對的，複合材中 ABS 及 rPS 之比例則對其 MOE 無顯著之影響。

另一方面，以射出成型方式所製備之 WPC 抗彎性質則如圖 1B 所示。由圖中發現，以射出成型方式製備複合材時，於 ABS 塑膠材料中添加 30% 木粒片 (W3P0A7) 時，ABS 之 MOR 及 MOE 分別由 71.4 MPa 及 2.4 GPa 提高至 79.5 MPa 及 5.1 GPa。而於 rPS 中添加 30% 木粒片 (W3P7A0) 時，其 MOR 則由 68.2 MPa 下降到 61.1 MPa，但二者間無顯著差異；相對的，MOE 則由 3.2 GPa 提高

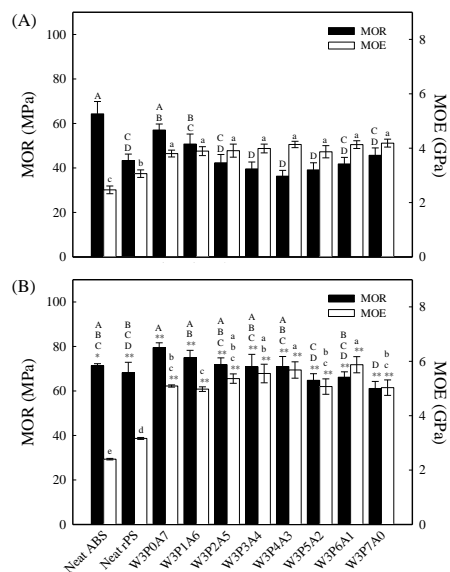


圖 1 以熱壓成型 (A) 及射出成型 (B) 製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之抗彎性質。
Fig. 1 Flexural properties of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by compression (A) and injection (B) moldings. Bars with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; compared with hot compression molding.

表 3 以熱壓成型及射出成型方式製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之抗拉性質

Table 3 Tensile properties of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by hot compression and injection moldings

Specimens	Hot compression molding			Injection molding		
	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Neat ABS	29.7 ± 2.0 ^a	2.1 ± 0.1 ^c	1.62 ± 0.16 ^a	41.1 ± 0.2 ^{cd**}	2.0 ± 0.0 ^f	15.84 ± 3.48 ^{a**}
Neat rPS	23.3 ± 1.2 ^{bc}	2.5 ± 0.0 ^d	0.92 ± 0.13 ^c	39.3 ± 0.2 ^{d**}	2.5 ± 0.0 ^e	1.98 ± 0.07 ^{b**}
W3P0A7	29.5 ± 0.7 ^a	2.9 ± 0.0 ^c	1.21 ± 0.05 ^b	47.3 ± 1.0 ^{a**}	3.5 ± 0.0 ^{d**}	2.00 ± 0.17 ^{b**}
W3P1A6	24.6 ± 0.8 ^b	2.9 ± 0.1 ^c	0.91 ± 0.03 ^c	47.3 ± 2.1 ^{a**}	3.7 ± 0.1 ^{bcd**}	1.82 ± 0.15 ^{b**}
W3P2A5	23.1 ± 0.8 ^{bc}	3.0 ± 0.1 ^{abc}	0.76 ± 0.08 ^{cd}	45.6 ± 1.2 ^{ab**}	3.8 ± 0.0 ^{abc**}	1.75 ± 0.13 ^{b**}
W3P3A4	19.3 ± 1.6 ^d	3.0 ± 0.1 ^{bc}	0.69 ± 0.06 ^d	43.7 ± 0.6 ^{bc**}	3.8 ± 0.1 ^{ab**}	1.61 ± 0.08 ^{b**}
W3P4A3	19.7 ± 0.9 ^d	3.0 ± 0.0 ^{abc}	0.68 ± 0.03 ^d	42.5 ± 1.0 ^{c**}	4.0 ± 0.1 ^{a**}	1.52 ± 0.02 ^{b**}
W3P5A2	19.0 ± 1.5 ^d	2.9 ± 0.0 ^c	0.69 ± 0.06 ^d	42.0 ± 1.0 ^{cd**}	3.6 ± 0.1 ^{cd**}	1.64 ± 0.05 ^{b**}
W3P6A1	21.1 ± 0.9 ^{cd}	3.1 ± 0.1 ^{ab}	0.72 ± 0.03 ^{cd}	40.9 ± 0.3 ^{cd**}	4.0 ± 0.1 ^{a**}	1.42 ± 0.07 ^{b**}
W3P7A0	23.2 ± 1.4 ^{bc}	3.2 ± 0.1 ^a	0.79 ± 0.04 ^{cd}	41.2 ± 1.7 ^{cd**}	3.7 ± 0.1 ^{bc**}	1.43 ± 0.05 ^{b**}

Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant differences among groups ($p < 0.05$). ** $p < 0.01$; compared with hot compression molding.

至 5.0 GPa。此試驗結果與 Poletto 及 Zattera (2017) 利用射出成型方式製備 PS 及纖維素纖維 (Cellulose fibers) 複合材之結果相似，其指出添加 30% 纖維素纖維會降低 PS 之抗彎強度，而提高 PS 之抗彎彈性模數。再者，不同 ABS 及 rPS 比例之射出成型 WPC 抗彎性質與熱壓成型方式所製備者之趨勢相似，其 MOR 亦隨著 rPS 之比例提高而降低，當 rPS 之添加量達 20% (W3P2A5) 後，複合材之 MOR 則無顯著差異；而複合材中 ABS 及 rPS 之比例則對 MOE 無顯著影響。此外，比較熱壓成型及射出成型所製備之複合材料抗彎性質可以發現，以射出成型方式所製備之複合材料抗彎性質均較熱壓成型者為高。而造成此現象之原因，主要係以射出成型方式製備複合材料時，木粒片於複合材內部之纖維走向具有高度之一致性，且塑膠基質對木粒片之包覆效果較熱壓成型者佳，故於承受應力時較能有效自塑膠基質傳遞之木粒片，進而提高複合材料之抗彎性質 (Stark and Matuana, 2004; Migneault *et al.*, 2009)。

一般而言，木材塑膠複合材料之抗拉性質能初步判斷複合材內部之界面性質；換言之，較高之抗拉強度即表示複合材具有較佳之界面性質。而表 3 即為以熱壓成型及射出成型方式所製備不同比例 rPS 及 ABS 之 WPC 抗拉性質，由表中試驗結果可以發現，以熱壓成型方式製備 WPC 時，添加 30% 木粒片對 ABS 之抗拉強度 (29.7 MPa) 無顯著影響，其抗拉強度為 29.5 MPa。然而，WPC 之抗拉強度隨著 rPS 之比例提高而降低，當 rPS 比例達 30% 後 (W3P3A4) 則無顯著差異。造成此現象之原因，主要係純 rPS 之抗拉強度 (23.3 MPa) 較純 ABS 差所致。相對的，添加 30% 木粒片則能大幅提高純 ABS 及純 rPS 之抗拉彈性模數，且複合材中 ABS 及 rPS 之比例對其抗拉彈性模數無顯著影響，其值介於 2.9–3.2 GPa。再者，由破壞伸長率之試驗結果可以發現，複合材之破壞伸長率較純 ABS 及純 rPS 為低，且複合材中 ABS 及 rPS 比例對其影響與抗拉強度相似，亦隨著 rPS 之比例提高而降低，至 rPS 比例達 30% 後則無顯著差異。推測造成複合材破壞伸長率降低之原因，主要係木材為較不具延展性之材料，故添加至塑膠材料後會降低其延展性。

相對的，以射出成型方式所製備之 WPC 抗拉強度及抗拉彈性模數則均較純 ABS 及純 rPS 為佳

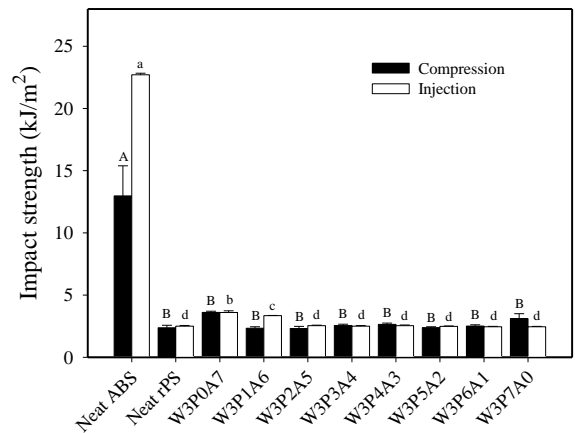


圖 2 以熱壓成型及射出成型方式製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之衝擊強度。

Fig. 2 Impact property of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by compression and injection moldings. Bars with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

(表 3)。而進一步比較不同 ABS 及 rPS 比例之 WPC 差異時可以得知，以 rPS 添加比例為 0% (W3P0A7) 及 10% (W3P1A6) 之複合材料最佳，其抗拉強度均為 47.3 MPa。其後，複合材料之抗拉強度隨 rPS 之比例提高而降低，當 rPS 比例達 30% 後 (W3P3A4) 則無顯著差異，此趨勢與上述熱壓成型者相似。同樣的，WPC 之抗拉彈性模數變化趨勢亦與熱壓成型者相似，其值則介於 3.5–4.0 GPa。至於破壞伸長率方面，射出成型所製備純 ABS 試片之值明顯較熱壓成型者為高。同時，添加 30% 木粒片大幅降低純 ABS 之破壞伸長率，其值由 15.84% 降低至 2.00%。然而，不同 ABS 及 rPS 比例則對射出成型複合材料之破壞伸長率無顯著影響，且與純 rPS 間無顯著差異。綜合上述抗拉性質試驗結果可以發現，射出成型所製備複合材料之抗拉性質均較熱壓成型者佳。推測造成此現象之原因，主要係射出成型複合材料中塑膠基質對木粒片之包覆性較佳，故其界面性質較熱壓成型者為佳，使應力能較有效的自塑膠基質傳遞之木粒片所致 (Stark and Matuana, 2004; Migneault *et al.*, 2009)。

此外，不同塑膠配比及不同成型方式所製備之 WPC 衝擊強度試驗結果如圖 2 所示，由圖中結果可以得知，以熱壓成型方式製備材料時，純 ABS 之衝擊強度最高，其值為 13.0 kJ/m²。然而，添加

30%木粒片製備成 WPC 後，ABS 之衝擊強度值大幅降低至 3.6 kJ/m^2 。同時，複合材料中 ABS 及 rPS 之比例對其衝擊強度無顯著影響，其衝擊強度介於 $2.3\text{--}3.1 \text{ kJ/m}^2$ ，且與純 rPS 間亦無顯著差異。同樣的，以射出成型方式所製備者亦具有相似之趨勢，仍以純 ABS 之衝擊強度最高，其值為 22.7 kJ/m^2 ；而添加 30%木粒片製備成 WPC 後，ABS 之衝擊強度值亦大幅降低至 3.6 kJ/m^2 ，且複合材料之衝擊強度隨 rPS 之比例提高而降低，當 rPS 比例達 20% (W3P2A5) 後則無顯著差異，並與純 rPS 間無顯著差異。

(III) 不同 ABS 及 rPS 比例所製備木材塑膠複合材料之黏彈性質

一般而言，材料均兼具彈性及黏性二種特性，而透過動態機械分析儀 (DMA) 能有效分析材料於溫度變化過程物性之變化，並藉由試驗所得之

儲存模數 (Storage modulus, E') 及損失模數 (Loss modulus, E'')，探討材料之黏彈性。同時，損失正切 (Loss tangent, $\tan \delta$) 定義為損失模數除以儲存模數，其峰值即為玻璃轉移溫度 (Glass transition temperature, T_g)。因此，本研究為了瞭解不同複合材料製備方式以及不同比例之 ABS 及 rPS 對 WPC 黏彈性質之影響，即以 DMA 對各組試材進行檢測，其試驗結果分別如圖 3 及圖 4 所示。其中，圖 3 為利用熱壓成型方式所製備不同 ABS 及 rPS 比例之 WPC 試驗結果。由圖 3A 中試材之儲存模數可以發現，各組試材於玻璃態區 ($30\text{--}100^\circ\text{C}$) 時，其儲存模數均隨溫度提高而降低。推測其原因，主要係塑膠基質之分子鏈移動性隨溫度上升而提高所致 (Poathan *et al.*, 2003; Hameed *et al.*, 2007)。而進一步比較各組試材之差異時可以發現，於純 ABS 或純 rPS 中添加 30%木粒片時，其儲存模數均大幅提高；以 30°C 為例，其儲存模數分別由 3.4 GPa

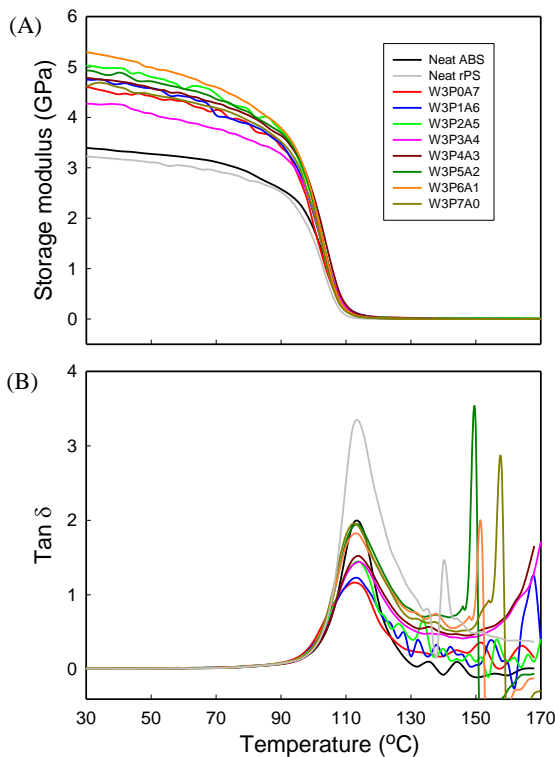


圖 3 以熱壓成型方式製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之儲存模數 (A) 及損失正切 (B)。Fig. 3 Storage modulus (A) and $\tan \delta$ (B) of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by hot compression molding.

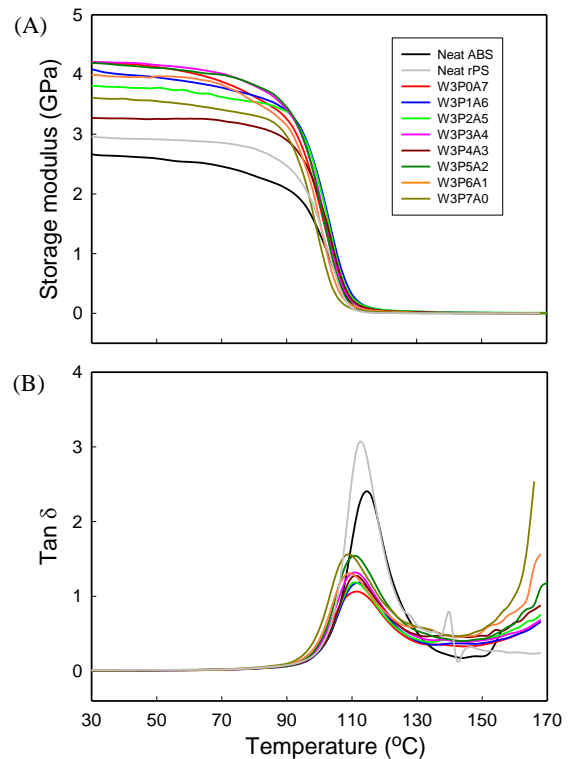


圖 4 以射出成型方式製備不同 ABS 及 rPS 比例木材塑膠複合材料之儲存模數 (A) 及損失正切 (B)。Fig. 4 Storage modulus (A) and $\tan \delta$ (B) of wood-plastic composites with various ratios of ABS and rPS by injection molding.

(ABS) 及 3.2 GPa (rPS) 提高至 4.6 GPa。顯示，添加具有較高挺性之木質材料至熱塑性塑膠中可有效提高其彈性。相對的，由圖 3B 中可以發現，各組複合材損失正切之峰值均約為 114°C，顯示添加木粒片對 ABS 及 rPS 之 T_g 無顯著影響。

另一方面，圖 4 則為利用射出成型方式所製備不同 ABS 及 rPS 比例之 WPC 試驗結果。由圖 4A 之儲存模數可以發現，射出成型所製備複合材料之變化趨勢與上述熱壓成型者相似，即複合材料之儲存模數均較純塑膠材料為高。以添加 30% 木粒片之 WPC 為例，其於 30°C 下之儲存模數分別由純 ABS 及純 rPS 之 2.7 GPa 及 3.0 GPa 提高至 4.2 (W3P0A7) 及 3.6 GPa (W3P7A0)。此試驗結果與 Poletto 及 Zattera (2017) 之試驗結果相似，其指出造成此現象之原因主要係纖維之強化效果所致。然而，由圖 4B 中複合材料之損失正切則可以發現，射出成型複合材料之 T_g 有往低溫偏移之現象，其值由純 ABS 及純 rPS 之 114°C 及 112°C 降低至 110–112°C。

IV、結論

本研究主要係以熱壓成型及射出成型二種方式製備不同比例 ABS 及 rPS 之木材塑膠複合材料，除了探討添加杉木粒片對 ABS 及 rPS 性質之影響外，亦探討不同基質 ABS 及 rPS 比例以及製備方式對複合材料性質之影響。試驗結果顯示，不同 ABS 及 rPS 之配比對木材塑膠複合材料之含水率無顯著影響，而射出成型複合材料之含水率則較熱壓成型者低。另外，抗彎性質方面，添加杉木粒片能有效提高塑膠基質之抗彎彈性模數，但對抗彎強度則無顯著影響；而射出成型複合材料之抗彎性質均較熱壓成型者佳。同樣的，抗拉性質亦具有相似之趨勢，惟射出成型之複合材抗拉強度較純塑膠為高；而破壞伸長率均顯著降低。再者，添加木粒片會降低純 ABS 之衝擊強度，但對純 rPS 則無顯著影響。同時，不同 ABS 及 rPS 之配比對射出成型複合材料之各項機械性質均無顯著影響，但熱壓成型複合材料之抗彎及抗拉強度則隨 rPS 比例提高而降低。至於黏彈性質方面，複合材料之儲存模數均較純塑膠為高。而以熱壓成型方式製備之複合材料對塑膠基質之 T_g 無顯著影響；相對的，射出成型複合材料之 T_g 則較未添加木粒片者

為低。

V、謝誌

本研究承蒙國立中興大學實驗林管理處經費補助，特此申謝。

VI、參考文獻

1. 中華民國國家標準 CNS 15730 (2014) 木材-塑膠之再生複合材。經濟部標準檢驗局。
2. 吳志鴻 (2009) 淺談木材塑膠複合材之開發與利用。林業研究專訊 16(6) : 33–35。
3. ASTM D 256-10 (2010) Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics. ASTM international, West Conshohocken, PA.
4. ASTM D 638-08 (2008) Standard test methods for tensile properties of plastics. ASTM international, West Conshohocken, PA.
5. Ashori, A. (2008) Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technol.* 99:4661–4667.
6. Bonhomme, S., A. Cuer, A.-M. Delort, J. Lemaire, M. Sancelme, and G. Scott (2003) Environmental biodegradation of polyethylene. *Polym. Degrad. Stabil.* 81:441–452.
7. 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.
8. Clemons, C. M. and R. E. Ibach (2004) Effects of processing method and moisture history on laboratory fungal resistance of wood-HDPE composite. *Forest Prod. J.* 54(4):50–57.
9. Clemons, C. M., D. F. Caulfield, and A. J. Giacomini (1999) Dynamic fracture toughness of cellulose-fiber-reinforced polypropylene: preliminary investigation of microstructural effects. *J. Elastom. Plast.* 31:367–378.

10. García, M., J. Hidalgo, I. Garmendia, and J. García-Jaca (2009) Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. *Compos. Part A-Appl. S.* 40:1772–1776.
11. Hameed, N., P. A. Steekumar, and B. Francis (2007) Morphology, dynamic mechanical and thermal studies on poly(styrene-*co*-acrylonitrile) modified epoxy resin/glass fibere composites. *Compos. Part A-Appl. S.* 38:2422–2432.
12. Lee, C.-H., T.-L. Wu, Y.-L. Chen, and J.-H. Wu (2010) Characteristics and discrimination of five types of wood plastic composites by FTIR spectroscopy combined with principal component analysis. *Holzforschung* 64:699–704.
13. Maldas, D. and B. V. Kokta (1989) The effect of aging conditions on the mechanical properties of wood fiber-polystyrene composites: I. chemithermomechanical pulp as a reinforcing filler. *Compos. Sci. Technol.* 36:167–182.
14. Migneault, S., A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, and M. P. Wolcott (2009) Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. *Compos. Part A-Appl. S.* 40:80–85.
15. Pothan, L. A., Z. Oommen, and S. Thomas (2003) Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Compos. Sci. Technol.* 63:283–293.
16. Poletto, M. and A. J. Zattera (2017) Mechanical and dynamic mechanical properties of polystyrene composites reinforced with cellulose fibers: coupling agent effect. *J. Thermoplast. Compos.* 30:1242–1254.
17. 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.
18. Stark, N. M., L. M. Matuana, and C. M. Clemons (2003) Effect of processing method on accelerated weathering of woodflour-HDPE composites. *The Seventh International Conference on Wood Fiber-Plastic Composites.* pp. 79–87.
19. Yang, T.-C., T.-L. Wu, K.-C. Hung, Y.-L. Chen, and J.-H. Wu (2015) Mechanical properties and extended creep behavior of bamboo fiber reinforced recycled poly(lactic acid) composites using the time–temperature superposition principle. *Constr. Build. Mater.* 93:558–563.