

竹材加工廢料應用在生物可分解型塑膠 複合材製備之研究

吳東霖¹ 陳載永² 吳志鴻^{3*}

(收件日期：民國100年10月31日、接受日期：民國100年12月14日)

【摘要】本研究利用桂竹加工廢料及聚乳酸製備生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材 (Bamboo particle-PLA composite, BPC)，並測定其竹材粒片尺寸、竹材粒片含量及生物系潤滑劑添加量對複合材各項物理機械性質之影響，以探討複合材最適化製備條件。試驗結果顯示，利用竹材粒片尺寸-6+16 mesh所製備之竹材粒片聚乳酸複合材，具有最佳之抗彎強度及最小的吸水率。此外，於聚乳酸基質中混入竹材粒片，可提升複合材抗拉彈性模數及其橡膠態區之儲存模數。而添加適量的生物系潤滑劑 (2-4 wt%) 則可增加複合材耐水性、尺寸安定性以及儲存模數。

【關鍵詞】竹材粒片聚乳酸複合材、生物可分解型、生物系潤滑劑、物理機械性質、儲存模數

APPLICATION OF BAMBOO RESIDUE FOR MANUFACTURE OF THE BIODEGRADABLE PLASTIC COMPOSITE

Tung-Lin Wu¹ Tsai-Yung Chen² Jyh-Horng Wu^{3*}

(Received: October 31, 2011; Accepted: December 14, 2011)

【Abstract】In this study, Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) residue and polylactic acid (PLA) were employed to manufacture the biodegradable bamboo particle-PLA composite (BPC). In order to obtain an optimal formula for composite processing, the physicomechanical properties of BPC were determined as functions of bamboo particle size, bamboo particle content and bio-based lubricant content. Results demonstrated that the BPC with bamboo particle of -6+16 mesh exhibited the strongest MOR and the lowest water absorption. In addition, the tensile modulus and storage modulus (rubbery plateau) were significantly improved when the PLA reinforced

¹ 國立中興大學森林學系研究生，40227 台中市南區國光路250號。

Graduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsing University. 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan.

² 國立中興大學森林學系名譽教授，40227 台中市南區國光路250號。

Professor Emeritus, Department of Forestry, National Chung Hsing University. 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan.

³ 國立中興大學森林學系副教授，通訊作者，40227 台中市南區國光路250號。

Associate Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan.
Corresponding Author. E-mail: eric@nchu.edu.tw.

with bamboo particle. On the other hand, the water absorption resistance, dimensional stability and storage modulus of BPC could be increased by adding the bio-based lubricant at weight fraction of 2-4%.

【Keywords】 Bamboo particle-PLA composite, Biodegradable, Bio-based lubricant, Physicomechanical property, Storage modulus

I、前言

根據林務局第三次森林資源及土地利用調查資料，台灣林地面積為2,102,400公頃，占全島總面積58.5%，其森林覆蓋率在全球主要國家居第八位，其中竹林面積更達152,300公頃，顯示台灣的竹材資源極為豐富。因此，竹材應用於國內民生用途之範圍甚廣，舉凡家具、編織、建築、造紙及工藝等均為其利用標的。另外，根據1974年台灣竹類資源調查資料，在所有竹類中經濟價值最高且栽種面積最廣者為麻竹，其次為桂竹、刺竹、綠竹、孟宗竹；其中，桂竹因材質優良且用途廣泛，而成為台灣竹類中最重要的竹材資源（葉英晉，2000）。然而，這些竹材在加工及製造過程中，往往會產生許多殘料，而此殘料一般多作為焚燒原料或任其腐朽，鮮少得到有計畫及有系統的回收與再利用，其不僅耗費寶貴的森林資源，更對環境造成莫大的衝擊。因此，為降低竹材廢料所造成之環保問題，國內許多專家學者曾著手進行竹材開發於林產加工利用之相關研究，其中包含竹廢料製造粒片板（陳載永，1982；陳載永、王瀛生，1981）、礦物性複合材（陳載永等，1999；徐俊雄等，1999）及竹青保綠（吳志鴻等，2001；Wu *et al.*, 2005）等方面。

而近年來，木材塑膠複合材（Wood-plastic composite, WPC）的發展已漸趨完善，且應用領域亦十分廣泛，其主要係因為這類複合材同時結合了木材和塑膠兩種材料的特性，因此可以相互的改善兩種材料各自之缺點。根據前人研究發現，於塑膠基質中混入木質纖維後，可以明顯的提升高分子材料之抗彎強度（Modulus of rupture, MOR）及抗彎彈性模數（Modulus of elasticity, MOE）（張懋如等，2009；Ochi, 2006），且所製備之複合材亦能改善木材的尺寸安定性、耐腐朽性，並增加高分子材料的挺性以及降低生產成本等（陳合進等，2003；陳載永等，2000；Chen *et al.*, 2006；Saheb and Jog, 1999）。目前，有關WPC的製備大多採用聚乙烯（Polyethylene, PE）、聚丙烯（Polypropylene, PP）及聚苯乙烯（Polystyrene, PS）等化石工業所生產之熱可塑性高分子（Lee *et al.*, 2010）。而這些高分子無法自然分解，因此在廢棄後常造成嚴重的環境污染問題。有鑑於此，開發一具生物可分解性之WPC，即為相當重要之研究課題之一。而聚乳酸（Polylactic acid, PLA）為天然之聚酯類高分子，其具有生物可分解性、生物吸收性、良好的機械性質及低伸長率等特性（Gutierrez-Villarreal *et al.*, 2008；Garlotta, 2001）。

因此，若以PLA作為複合材料之基質，將可增加材料的生物分解性能，進而降低其對環境所造成之危害。然而，目前以竹材加工廢料製備生物可分解型塑膠複合材尚缺乏相關之研究，故本試驗即以生物可分解型塑膠（聚乳酸）取代目前常見之石油系熱塑性塑膠，除評估生物可分解型塑膠應用於竹材粒片聚乳酸複合材（Bamboo particle-PLA composite, BPC）製備之可行性外，並針對複合材之各項物理性質及機械性質進行系統性的評估與研究，以期獲得最適化生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材之製備條件。

II、材料與方法

(I) 試驗材料

1. 竹材加工廢料

本試驗所用之試材，取自南投縣竹山地區竹材加工廠之桂竹（*Phyllostachys makinoi*）刨屑。經磨切機製成粒片後，隨即將所製得之桂竹粒片置入70°C烘箱中乾燥24 h後，續以震動篩分機篩選粒徑尺寸為-6+16、-16+24、-24+30以及-30+60 mesh共四部分之粒片備用。

2. 生物可分解型塑膠材料

本試驗所使用之生物可分解型塑膠材料為聚乳酸，購自偉盟工業股份有限公司，型號為NCP0001，密度1250 kg/m³，熔流指數為4-8 g/10 min，熔融溫度則為140-150°C。試驗前，將PLA顆粒，利用圓盤式磨粉機進行磨粉處理後，續以篩分機篩分出粒徑尺寸通過20 mesh之粉末，以供後續複合材製備之用。

3. 生物系潤滑劑（Bio-based lubricant）

本試驗所使用之生物系潤滑劑為大豆油。試驗時，藉由潤滑劑將粒片均勻分散於PLA基質中，以形成均質複合材板坯。

(II) 生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材之製備

本試驗所製備之生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材，主要分為不同竹材粒片尺寸（-6+16、-16+24、-24+30及-30+60 mesh）、不同竹材粒片/PLA混合比（分別為0/100、20/80、30/70、40/60、50/50、60/40、70/30及80/20 wt%）及不同生物系潤滑劑添加量（相對於竹材粒片絕乾重之1、2、4及8 wt%）等三部分，而複合材製備之預設密度為900 kg/m³，成板尺寸為300 mm（長）× 200 mm（寬）× 4 mm（厚）。依上述試驗所需重量秤取絕乾竹材粒片、聚乳酸及潤滑劑，並將其置於犁頭式混合機中攪拌，經5 min均勻攪拌後，將其均勻灑入成型模具以抄製成板坯。另外，於板坯中心層置入K type熱電耦線後，將板坯置入熱壓機中，熱壓溫度為180°C，於壓力4.5 MPa下進行熱壓。當板坯中心溫度達165°C時，再將板坯置於冷壓機中進行冷卻，使板坯中心溫度冷卻至40°C以完成複合材之製備。之後，將BPC置於23°C、50% RH之恆溫恆濕室中調濕7天，以供後續各項性質分析。

(III) 性質分析

依據美國材料試驗協會（American Society for Testing Material, ASTM）之檢測標準，檢測複合材之密度（ASTM D 2395-07a）、含水率（ASTM D 4442-07）、2 h與24 h吸水率及吸水厚度膨脹率（ASTM D

1037-06a)、抗彎性質 (ASTM D 790-07) 以及抗拉性質 (ASTM D 638-08) 等各項物理機械性質。

(IV) 動態機械性質分析 (Dynamic mechanical analysis, DMA)

將試材置於PerkinElmer動態機械分析儀 (DMA-8000, USA) 中, 以單懸臂 (Single cantilever) 彎曲試驗模式進行試驗。分析時, 系統升溫速率為 2 °C/min、頻率為1 Hz, 測試溫度範圍為0-160°C。

(V) 統計分析

本試驗利用SAS統計系統進行變異數分析 (Analysis of variance, ANOVA), 並透過Scheffe檢定 (Scheffe's test) 評估各組間之差異性 (信賴區間為95%)。

III、結果與討論

(I) 竹材粒片尺寸對BPC性質之影響

1. 竹材粒片尺寸對BPC物理性質之影響

爲了探討竹材粒片尺寸對BPC性質之影響, 本試驗利用-6+16、-16+24、-24+30及-30+60 mesh共4種粒片尺寸, 並以50/50 (wt%) 之竹材粒片與PLA混合比製備BPC。表1爲竹材粒片尺寸對BPC物理性質之影響, 表中結果顯示, 竹材粒片尺寸對複合材密度並無顯著影響, 其密度均介於970-1019 kg/m³之間, 因此於後續機械性質之比較上, 可忽略密度對其性質之影響。而在含水率性質方面, 4種不同竹材

粒片尺寸所製備之BPC, 除了-16+24 mesh及-30+60 mesh之間有顯著差異外, 其他各組間則無顯著差異, 其含水率介於3.0-3.8%。此外, 本試驗將BPC浸水2 h及24 h後, 測定其吸水率及吸水厚度膨脹率, 由表1可以發現, BPC之2 h吸水率, 由小到大依序爲-6+16 mesh (2.2%)、-16+24 mesh (6.5%)、-24+30 mesh (9.0%) 及-30+60 mesh (10.7%)。同樣的, 24 h吸水率亦有相同趨勢, 顯示隨著竹材粒片尺寸的減小, BPC之吸水率有隨之增加之趨勢。而WPC之吸水性質除易受到木材纖維中的細孔 (Fine pores)、細胞腔 (Lumens) 及羥基 (Hydroxyl group) 數量之多寡等影響外, 木質材料與塑膠間界面的不相容性, 亦會導致其界面間產生許多的裂縫 (Flaws) 或缺口 (Gapes), 使得水分子可透過毛細管 (Capillary) 作用滲透到WPC之內部 (Adhikary *et al.*, 2008; Espert *et al.*, 2004)。因此, 造成竹材粒片尺寸較小之BPC具有較高吸水率之原因, 推測主要係因爲隨著竹材粒片尺寸的減小, 其竹材之表面積及裸露之羥基數隨之增加, 進而提高複合材與水分子接觸之機會, 導致BPC的吸水率隨之上升。然而, 在BPC之2 h及24 h吸水厚度膨脹率方面, 竹材粒片尺寸大小並無顯著之影響, 此一結果與張懋如等人 (2009) 以不同台灣二葉松粒片尺寸製備複合材之試驗結果相似。

表 1 竹材粒片尺寸對BPC物理性質之影響

Table 1 Effects of bamboo particle size on physical properties of BPC

Bamboo particle size (mesh)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	2 h soaking		24 h soaking	
			Water absorption (%)	Thickness swelling (%)	Water absorption (%)	Thickness swelling (%)
-6+16	986 ± 23 ^a	3.3 ± 0.4 ^{ab}	2.2 ± 0.6 ^b	3.0 ± 0.8 ^a	7.5 ± 1.4 ^c	4.5 ± 1.0 ^a
-16+24	1019 ± 62 ^a	3.0 ± 0.2 ^b	6.5 ± 2.9 ^{ab}	3.9 ± 1.2 ^a	9.3 ± 2.8 ^{bc}	5.0 ± 1.0 ^a
-24+30	1002 ± 40 ^a	3.4 ± 0.2 ^{ab}	9.0 ± 2.5 ^a	3.9 ± 0.4 ^a	12.5 ± 2.8 ^{ab}	4.8 ± 0.6 ^a
-30+60	970 ± 31 ^a	3.8 ± 0.1 ^a	10.7 ± 3.0 ^a	3.1 ± 0.6 ^a	15.2 ± 2.8 ^a	4.7 ± 0.4 ^a

The content of bamboo particle within BPC is 50 wt%. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$

2. 竹材粒片尺寸對BPC機械性質之影響

抗彎強度 (MOR) 與抗彎彈性模數 (MOE) 為評估複合材料機械性質之重要指標之一。由表2可以發現，以不同竹材粒片尺寸所製備之BPC，除-6+16 mesh具有較高之MOR (38.7 MPa) 之外，其餘各組間並無顯著差異 (各組之值約為28 MPa左右)。而在MOE方面，各組間亦無統計上差異，其值均介於2.5-3.1 GPa之間。另一方面，由表2試驗結果亦可得知，4種粒片尺寸中以-6+16 mesh所製備之BPC具有最佳之

抗拉強度 (23.0 MPa)，而隨著竹材粒片尺寸減小，其抗拉強度則隨之下降。至於在抗拉彈性模數方面，亦呈現相似趨勢，各組間仍以-30+60 mesh所製備之BPC其抗拉彈性模數最小 (2.5 GPa)。另外，在破壞伸長率方面，不同竹材粒片尺寸所製備之BPC其各組間之破壞伸長率並無顯著差異。綜合上述結果得知，以-6+16 mesh之竹材粒片所製備之BPC，除具有較佳抗彎強度之外，亦具有較佳之抗拉性質。

表 2 竹材粒片尺寸對BPC抗彎及抗拉性質之影響

Table 2 Effects of bamboo particle size on flexural and tensile properties of BPC

Bamboo particle size (mesh)	Flexural properties		Tensile properties		
	MOR (MPa)	MOE (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
-6+16	38.7 ± 2.4 ^a	3.1 ± 0.4 ^a	23.0 ± 2.6 ^a	3.3 ± 0.1 ^a	0.9 ± 0.1 ^a
-16+24	28.8 ± 2.2 ^b	2.6 ± 0.2 ^a	20.1 ± 6.1 ^{ab}	3.4 ± 0.4 ^a	0.8 ± 0.1 ^a
-24+30	29.1 ± 4.5 ^b	3.1 ± 0.4 ^a	16.8 ± 3.8 ^{ab}	2.9 ± 0.4 ^{ab}	0.8 ± 0.1 ^a
-30+60	25.8 ± 2.5 ^b	2.5 ± 0.3 ^a	14.7 ± 2.6 ^b	2.5 ± 0.3 ^b	0.8 ± 0.1 ^a

The content of bamboo particle within BPC is 50 wt%. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$

3. 竹材粒片尺寸對BPC熱性質之影響

本研究以DMA評估各複合材於不同溫度下之儲存模數 (Storage modulus) 及損失正切 (Loss tangent, $Tan \delta$)，其試驗結果如圖1所示。由圖1A中可以發現，BPC於玻璃態區 (0-60°C) 之儲存模數均遠高於橡膠態區 (60-160°C)。其原因推測主要係當溫度高於PLA之玻璃轉移溫度 (Glass transition temperature, T_g) (實測值約68°C) 時，PLA分子之移動性隨溫度升高而提高 (Kim *et al.*, 2006)，進而使BPC

儲存模數隨之下降。另一方面，由圖1A中亦可以發現，以-16+24 mesh之竹材粒片所製備之BPC，其儲存模數均較其他複合材者大。相對的，以竹材粒片尺寸為-24+30 mesh及-30+60 mesh所製備之BPC，其儲存模數則最小。以室溫 (25°C) 為例，-16+24 mesh所製備之BPC，其儲存模數約為-24+30或-30+60 mesh所製備者之1.3倍。此外，由圖1B中則可以發現，以不同竹材粒片尺寸所製備之BPC，其 T_g 均約為68°C，各組間並無顯著之差異。

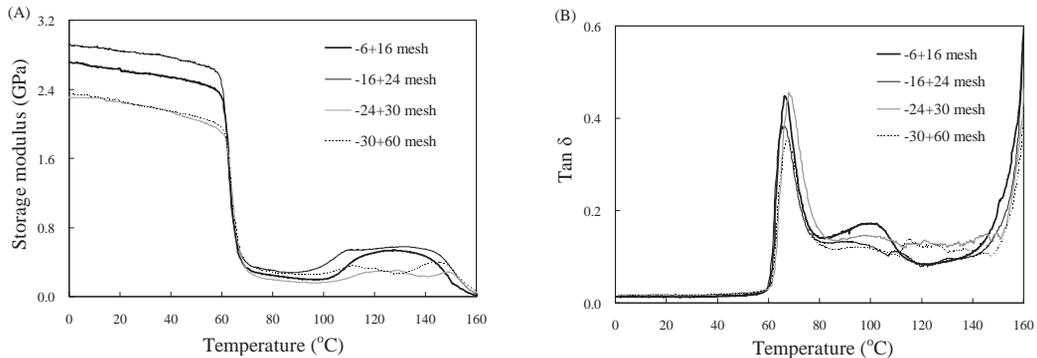


圖 1 竹材粒片尺寸對BPC儲存模數 (A) 及 $Tan \delta$ (B) 之影響
 Fig. 1 Effects of bamboo particle size on storage modulus (A) and $Tan \delta$ (B) of BPC. The content of bamboo particle within BPC is 50 wt%

(II) 竹材粒片與PLA混合比對BPC性質之影響

1. 竹材粒片與PLA混合比對BPC物理性質之影響

表3為不同竹材粒片含量所製備之BPC物理性質，由表中可以得知，BPC之密度隨竹材粒片含量增加而下降 (各組密度值介於948-1075 kg/m³之間)，但竹材粒片含量為30-80 wt%之複合材，其密度則不具統計上差異。另外，在含水率方面，則隨竹材粒片含量的增加而上升。而造成此現

象之原因主要係竹材為親水性物質，因此當BPC中竹材粒片之比例增加時，其含水率亦會隨之上升。而此結果與張懋如等人 (2009) 及Chen等人 (2006) 之試驗結果相似，均顯示WPC之含水率會隨著木材含量增加而增加。此外，由表3中BPC之2 h及24 h吸水率之結果則可以得知，當竹材含量為20-80 wt%時，BPC之吸水率會隨著竹材含量增加而上升，其2 h及24 h吸水率分別介於1.1-29.4%及3.2-35.3%。而此原因與含水率相同，主要是因為竹材屬於一親水

性物質，因此當BPC中竹材比例增加時，其吸水率即隨之增加。而吸水厚度膨脹率方面則與吸水率呈現相似之結果，當竹材含量為20-80 wt%時，BPC之吸水厚度膨脹率隨竹材含量增加而上升，經2 h及24 h之吸水試驗後，其厚度膨脹率分別介於0.4-17.1%及0.9-19.0%。而此一趨勢與Adhikary等人（2008）分析WPC性質所得之結果相似，均顯示隨木材含量的增加，WPC之吸水率及吸水厚度膨脹率亦隨之上升。然

而，當BPC中竹材含量超過70 wt%時，其吸水率及吸水厚度膨脹率，除了受到竹材與PLA混合比之影響外，PLA對竹材包覆的完整性亦為一重要影響因子。一般而言，當BPC中竹材含量低於30 wt%時，PLA分子對於竹材粒片具有較佳的包覆效果，因此可有效的降低竹材粒片與水分接觸之機會，致使BPC具有較佳抗吸水性及尺寸安定性。

表 3 竹材粒片含量對BPC物理性質之影響

Table 3 Effects of bamboo particle content on physical properties of BPC

Bamboo particle content (wt%)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	2 h soaking		24 h soaking	
			Water absorption (%)	Thickness swelling (%)	Water absorption (%)	Thickness swelling (%)
0	1075 ± 71 ^a	0.4 ± 0.2 ^g	0.0 ± 0.1 ^e	0.4 ± 0.1 ^e	0.3 ± 0.2 ^f	0.3 ± 0.2 ^f
20	1056 ± 54 ^{ab}	1.7 ± 0.1 ^f	1.1 ± 0.3 ^e	0.4 ± 0.1 ^e	3.2 ± 0.7 ^{ef}	0.9 ± 0.3 ^f
30	1013 ± 30 ^{abc}	2.3 ± 0.0 ^{ef}	4.7 ± 1.1 ^{de}	0.7 ± 0.4 ^e	8.5 ± 1.0 ^{de}	1.4 ± 0.3 ^{ef}
40	986 ± 28 ^{bc}	3.1 ± 0.1 ^{df}	6.2 ± 2.3 ^{de}	1.2 ± 0.3 ^e	11.6 ± 2.2 ^d	3.3 ± 0.8 ^{de}
50	970 ± 31 ^c	3.8 ± 0.1 ^{cd}	10.7 ± 3.0 ^{cd}	3.1 ± 0.6 ^d	15.2 ± 2.8 ^{cd}	4.7 ± 0.4 ^d
60	948 ± 48 ^c	4.5 ± 0.3 ^{bc}	16.8 ± 5.1 ^{bc}	5.6 ± 1.1 ^c	21.6 ± 4.8 ^{bc}	6.8 ± 0.4 ^c
70	946 ± 30 ^c	5.0 ± 0.3 ^{ab}	20.1 ± 2.0 ^b	9.4 ± 0.7 ^b	23.1 ± 4.5 ^b	10.4 ± 1.5 ^b
80	948 ± 22 ^c	5.3 ± 0.5 ^a	29.4 ± 2.0 ^a	17.1 ± 1.1 ^a	35.3 ± 2.3 ^a	19.0 ± 0.9 ^a

The size of bamboo particle within BPC is -30+60 mesh. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$

2. 竹材粒片與PLA混合比對BPC機械性質之影響

竹材與PLA混合比對BPC抗彎性質之影響如表4所示，由表中可以得知，當竹材含量由0 wt%增加至80 wt%時，BPC之MOR由72.1 MPa下降至10.0 MPa；顯示，BPC之

MOR值會隨竹材粒片含量增加而下降。而此一趨勢與Hung與Wu（2010）、Chen等人（2006）及Verhey等人（2001）之試驗結果相似。推測造成此現象之原因，主要係當竹材含量增加時，木質纖維間易因氫鍵作用而產生凝聚作用（Agglomeration），

此除導致材料分散性不佳使應力無法有效於PLA與竹材間傳遞 (Adhikary *et al.*, 2008) 外, PLA亦無法完全包覆竹材粒片, 致使竹材粒片與PLA間之界面缺陷增加, 進而導致BPC之抗彎性質降低。此外, 由表4亦可以發現, 竹材粒片含量介於0-60 wt%時, 其各組複合材MOE間並無統計上差異。因此, 複合材製備時, 選用竹材粒片含量為60 wt%者, 除具有良好

之抗彎性質外, 亦具有木質材料利用之優點。然而, 當竹材粒片含量提高至70 wt%或80 wt%時, 其MOE則大幅下降。由上述結果顯示, 竹材本身具高韌性及挺性之特點, 適量的混入竹材粒片可有效提升BPC之MOE; 然而, 當竹材粒片混入過量時, 則使PLA無法完全包覆竹材粒片並增加複合材內部孔隙, 進而導致複合材MOE降低 (Luo and Netravali, 1999)。

表 4 竹材粒片含量對BPC抗彎及抗拉性質之影響

Table 4 Effects of bamboo particle content on flexural and tensile properties of BPC

Bamboo particle content (wt%)	Flexural properties		Tensile properties		
	MOR (MPa)	MOE (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
0	72.1 ± 3.0 ^a	2.5 ± 0.1 ^{ab}	35.6 ± 5.9 ^a	2.2 ± 0.2 ^b	2.7 ± 0.5 ^a
20	45.7 ± 4.3 ^b	2.7 ± 0.3 ^{ab}	29.8 ± 3.2 ^a	2.9 ± 0.3 ^a	1.5 ± 0.1 ^b
30	37.3 ± 9.1 ^{bc}	2.7 ± 0.6 ^{ab}	21.5 ± 2.0 ^b	2.8 ± 0.2 ^{ab}	1.1 ± 0.1 ^{bc}
40	36.3 ± 9.3 ^{bcd}	3.0 ± 0.7 ^a	19.2 ± 2.1 ^{bc}	2.7 ± 0.2 ^{ab}	1.0 ± 0.0 ^{bc}
50	25.8 ± 2.5 ^{cde}	2.5 ± 0.3 ^{ab}	14.7 ± 2.6 ^{bc}	2.5 ± 0.3 ^{ab}	0.8 ± 0.1 ^c
60	22.4 ± 6.1 ^{def}	2.4 ± 0.6 ^{ab}	13.2 ± 2.1 ^c	2.7 ± 0.2 ^{ab}	0.7 ± 0.1 ^c
70	14.5 ± 4.1 ^{ef}	1.6 ± 0.5 ^{bc}	13.1 ± 1.8 ^c	2.8 ± 0.2 ^a	0.7 ± 0.0 ^c
80	10.0 ± 3.7 ^f	1.1 ± 0.5 ^c	12.1 ± 0.6 ^c	3.1 ± 0.1 ^a	0.7 ± 0.1 ^c

The size of bamboo particle within BPC is -30+60 mesh. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$

另一方面, 由表4試驗結果得知, 當竹材粒片含量由0 wt%增加至80 wt%時, BPC之抗拉強度由35.6 MPa下降至12.1 MPa; 顯示, BPC之抗拉強度隨竹材粒片含量增加而下降。而此一趨勢與Lee與Wang (2006) 之試驗結果相似。而造成此現象之原因推測與MOR相似, 主要係當竹材含量增加時, 會使竹材粒片與PLA間之界面

缺陷增加, 導致BPC之抗拉性質降低。此外, 由表4亦可以發現, 當竹材粒片含量由0 wt%增加至80 wt%時, BPC之抗拉彈性模數由2.2 GPa上升至3.1 GPa。此結果顯示, 適量的混入竹材粒片可有效提升BPC之抗拉彈性模數。然而, 在破壞伸長率方面, 當竹材粒片含量由0 wt%增加至80 wt%時, BPC之破壞伸長率則由2.7%下降至0.7%。

顯示，於PLA中混入竹材粒片會改變PLA之黏彈性 (Viscoelastic behavior)，使之較不具延展性 (Ductility)，進而使BPC破壞伸長率降低。

3. 竹材粒片與PLA混合比對BPC熱性質之影響

不同竹材粒片與PLA混合比所製備之BPC，其儲存模數如圖2A所示。由圖中可以發現，BPC於玻璃態區 (0-60°C) 時，其儲存模數會隨竹材粒片含量增加而下降。以室溫 (25°C) 為例，當竹材粒片含量由0 wt%增加至80 wt%時，試材之儲存模數由3.0 GPa下降至1.6 GPa。相反的，當溫度提高至90°C時，試材之儲存模數則由0.01 GPa提升至0.43 GPa。此結果顯示，以80 wt%竹材粒片含量所製備之BPC，有助於延緩橡

膠態區 (60-160°C) 儲存模數之下降。而造成此現象之原因，主要係當竹材含量增加時，竹材本身具有較高之熱屏障 (Heat barrier) 與熱安定性，因此，使複合材在高溫時能減緩其儲存模數之變化。另外，由圖2B中亦可以發現，不同竹材粒片含量之BPC，其 T_g 均約為68°C，各組間並無顯著差異。此外，由 T_g 點之 $\text{Tan } \delta$ 面積大小亦可發現，純PLA之阻尼值 (Damping) 最大，然而，此阻尼值則隨著竹材粒片含量的增加而下降。綜合上述結果可以得知，生物可分解型聚乳酸複合材若應用於高溫環境下 (超過 T_g 點)，雖其儲存模數會明顯下降，但可藉由竹材粒片的添加來增進複合材之熱抵抗性。

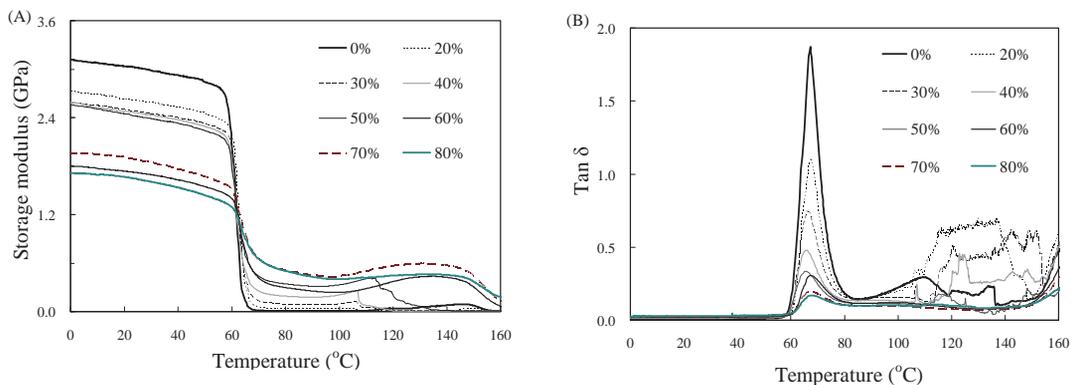


圖 2 竹材粒片含量對BPC儲存模數 (A) 及 $\text{Tan } \delta$ (B) 之影響

Fig. 2 Effects of bamboo particle content on storage modulus (A) and $\text{Tan } \delta$ (B) of BPC. The size of bamboo particle within BPC is -30+60 mesh

(III) 生物系潤滑劑添加量對BPC性質之影響

1. 生物系潤滑劑添加量對BPC物理性質之影響

生物系潤滑劑添加量對BPC物理性質之影響如表5所示，由表中可以得知，潤

滑劑添加量對複合材之密度並無顯著影響，其密度均介於956-1002 kg/m³之間。而在BPC含水率方面，由表中可以明顯發現，於BPC製備中添加不同含量之生物系潤滑劑時，含水率會隨潤滑劑添加量的提

高而略呈下降之趨勢。推測其原因，主要為潤滑劑屬於疏水性之油脂，因此，會降低BPC中竹材粒片之親水性，故添加潤滑劑製備BPC時，其含水率會明顯降低。此外，由表5的試驗結果亦可得知，以不同添加量（1、2、4及8 wt%）的生物系潤滑劑所製備之BPC，雖其2 h吸水率間並無顯著差異；然而，當潤滑劑添加比例為2 wt%

時，其24 h吸水率則與無添加潤滑劑之BPC間具有顯著差異。換言之，於BPC製備過程中添加2 wt%潤滑劑，能有效減少BPC之吸水性質。同樣的，在吸水厚度膨脹率方面，潤滑劑亦能明顯減少BPC之吸水特性，而此結果與吳東霖等人（2008）以及陳合進等人（2005）添加大豆油於WPC中所得之結果相似。

表 5 生物系潤滑劑添加量對BPC物理性質之影響

Table 5 Effects of bio-based lubricant content on physical properties of BPC

Lubricant content (wt%)*	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	2 h soaking		24 h soaking	
			Water absorption (%)	Thickness swelling (%)	Water absorption (%)	Thickness swelling (%)
0	970 ± 31 ^a	3.8 ± 0.1 ^a	10.7 ± 3.0 ^a	3.1 ± 0.6 ^a	15.2 ± 2.8 ^a	4.7 ± 0.4 ^a
1	956 ± 39 ^a	2.7 ± 0.2 ^b	9.0 ± 2.3 ^a	2.1 ± 0.4 ^{ab}	13.2 ± 2.6 ^{ab}	3.1 ± 0.5 ^b
2	1002 ± 26 ^a	2.7 ± 0.3 ^b	5.7 ± 2.2 ^a	1.6 ± 0.7 ^b	9.5 ± 2.1 ^b	2.7 ± 0.7 ^b
4	987 ± 69 ^a	2.4 ± 0.1 ^b	7.1 ± 4.1 ^a	1.7 ± 0.2 ^b	10.7 ± 4.0 ^{ab}	2.8 ± 0.4 ^b
8	956 ± 23 ^a	3.0 ± 0.3 ^b	5.5 ± 1.5 ^a	2.0 ± 0.5 ^b	10.0 ± 1.0 ^{ab}	3.0 ± 0.1 ^b

The size and content of bamboo particle within BPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$.

* Based on the oven dried weight of bamboo particles

2. 生物系潤滑劑添加量對BPC機械性質之影響

生物系潤滑劑添加量對BPC之抗彎性質如表6所示，由表中可以得知，添加量為0-8 wt%之BPC，各組之抗彎強度與抗彎彈性模數間並無顯著差異，顯示添加潤滑劑無法改善竹材粒片與PLA之結合性。換言之，潤滑劑雖可降低部分BPC之吸水性質，但對複合材之抗彎性質則不具改善效果。另一方面，由表6試驗結果亦可得知，BPC之抗拉強度隨潤滑劑添加量增加而下降，其抗拉強度由36.1 MPa（添加量0%）下降至30.6 MPa（添加量8%）；相對的，

對於抗拉彈性模數及破壞伸長率而言，則無顯著差異。此結果顯示，於複合材中添加潤滑劑，並無法有效的改善竹材粒片與PLA間之結合性。

3. 生物系潤滑劑添加量對BPC熱性質之影響

不同潤滑劑添加量所製備之BPC，其儲存模數如圖3A所示。由圖中可以發現，於BPC中添加潤滑劑時，其儲存模數均較未添加者高。以室溫（25°C）為例，當添加量由0 wt%增加至4 wt%時，BPC之儲存模數達到最大（3.0 GPa）。而當添加量超過4 wt%時，BPC之儲存模數則小幅下降。此外，由圖3B中亦可以發現，不同潤滑劑

表 6 生物系潤滑劑添加量對BPC抗彎及抗拉性質之影響

Table 6 Effects of bio-based lubricant content on flexural and tensile properties of BPC

Lubricant content (wt%)*	Flexural properties		Tensile properties		
	MOR (MPa)	MOE (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
0	59.9 ± 3.7 ^a	4.9 ± 0.3 ^a	36.1 ± 1.3 ^a	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.0 ^a
1	61.1 ± 5.7 ^a	5.1 ± 0.4 ^a	35.1 ± 2.0 ^{ab}	3.7 ± 0.2 ^a	1.2 ± 0.1 ^a
2	59.3 ± 4.6 ^a	5.1 ± 0.4 ^a	33.9 ± 2.1 ^{ab}	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.1 ^a
4	55.7 ± 3.0 ^a	5.0 ± 0.3 ^a	32.1 ± 1.8 ^{bc}	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.0 ^a
8	57.4 ± 1.6 ^a	5.2 ± 0.2 ^a	30.6 ± 1.1 ^c	3.4 ± 0.0 ^b	1.1 ± 0.1 ^a

The size and content of bamboo particle within BPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are the mean ± SD (n = 5). Different letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$.

* Based on the oven dried weight of bamboo particles

添加量所製備之BPC，其 T_g 均約為68°C，各組間並無顯著之差異。綜合上述結果可以得知，適當的添加潤滑劑能有效提升BPC之動態機械性質。

IV、結論

近年來因環保意識的抬頭及自然資源的匱乏，已有許多國家將資源再利用及廢棄物處理視為最重要的環保課題。因此，利用廢棄竹材加工廢料結合聚乳酸製備生物可分解型塑膠複合材，除了有效利用木質廢料及協助解決國內廢棄物處理等問題之外，亦可達到資源再生及節能減碳之目標。而為了使複合材具有較優良之物理機械性質，本試驗針對竹材粒片尺寸、竹材粒片與聚乳酸混合比及生物系潤滑劑添加量對竹材粒片聚乳酸複合材（BPC）物理機械性質及動態機械性質之影響進行

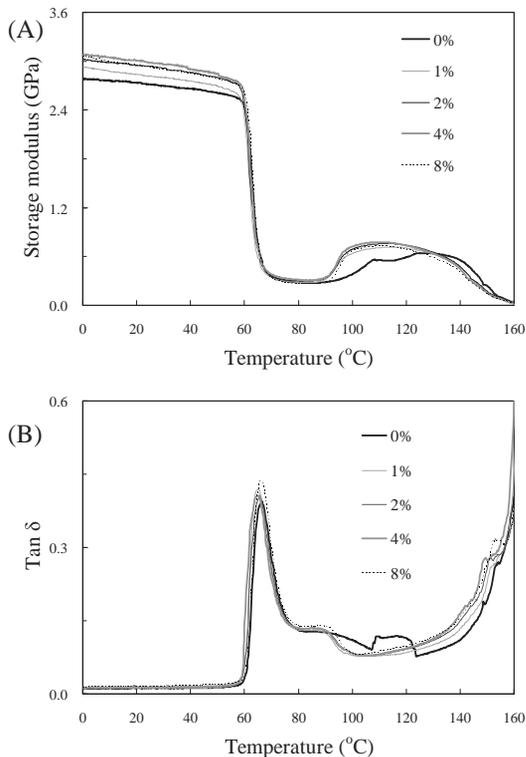


圖 3 生物系潤滑劑添加量對BPC儲存模數 (A) 及 $Tan \delta$ (B) 之影響

Fig. 3 Effects of bio-based lubricant content on storage modulus (A) and $Tan \delta$ (B) of BPC. The size and content of bamboo particle within BPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively

探討。試驗結果得知，利用竹材粒片尺寸-6+16 mesh所製備之BPC，具有較佳之抗彎強度；相對的，以竹材粒片尺寸-30+60 mesh所製備之BPC，則具有較高的吸水率。另外，以60 wt%竹材粒片含量所製備之BPC，除具有良好之抗彎性質外，兼具木質材料利用之優點。同時，BPC之抗拉彈性模數及其橡膠態區之儲存模數隨竹材粒片含量增加而提高。此外，添加生物系潤滑劑雖無法改善BPC之抗彎強度，但適量的添加（2-4 wt%）卻可提高複合材之耐水性、尺寸安定性以及儲存模數。

V、致謝

本研究感謝行政院農業委員會林務局予以經費補助（99-00-5-14），使本試驗得以順利完成，特此致謝。

VI、引用文獻

吳志鴻、葉汀峰、張上鎮（2001）鉻磷酸鹽處理麻竹之保綠機制。中華林學季刊 34:241-248。

吳東霖、洪克昌、王贊鈞、陳載永、吳志鴻（2008）不同界面改質處理對木材粒片-低密度聚乙烯複合材性質之影響。中華林學會97年度學術論文發表會論文集。pp. 1156-1166。

徐俊雄、陳載永、陳合進（1999）石膏-農林廢料複合材之性質。林產工業18:287-296。

張懋如、吳東霖、洪克昌、陳載永、吳志鴻（2009）台灣二葉松木材-塑膠複合材

之理學機械性質。林業研究季刊31:65-74。

陳合進、陳載永、徐俊雄（2005）戶外曝露對木材粒片-塑膠複合材性質之影響。林產工業24:107-112。

陳合進、陳載永、徐俊雄、黃偉銘（2003）模壓式製造木材-HDPE塑膠複合材戶外利用之接受性調查（I）：新安裝之設施的接受性。國立中興大學農林學報52(4):11-20。

陳載永（1982）竹材廢料製造建築用粒片板及其應用可能性之研究（二）。科學發展月刊10:502-511。

陳載永、王瀛生（1981）竹材廢料製造建築用粒片板之研究。中華林學季刊14:39-60。

陳載永、徐俊雄、游依玲（1999）石膏結合農林廢料複合材之水合作用。林產工業18:393-402。

陳載永、陳合進、徐俊雄（2000）簡介木質纖維與塑膠混鍊製造生態複合材之方法介紹。木工家具 187:89-93。

葉英晉（2000）好竹連山。大地地理出版事業股份有限公司。143頁。

Adhikary, K. B., S. Pang and M. P. Staiger (2008) Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B* 39:807-815.

Chen, H.-C., T.-Y. Chen and C.-H. Hsu (2006) Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites. *Holz als Roh- und Werkstoff*

- 64:172-177.
- Espert, A., F. Vilaplana and S. Karlsson (2004) Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A* 35:1267-1276.
- Garlotta, D. (2001) A literature review of poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment* 9:63-84.
- Gutierrez-Villarreal, M. H., M. G. Ulloa-Hinojosa and J. G. Gaona-Lozano (2008) Surface functionalization of poly(lactic acid) film by UV-photografting of N-vinylpyrrolidone. *Journal of Applied Polymer Science* 110:163-169.
- Hung, K.-C. and J.-H. Wu (2010) Mechanical and interfacial properties of plastic composite panels made from esterified bamboo particles. *Journal of Wood Science* 56:216-221.
- Kim, H. S., S. Kim, H. J. Kim and H. S. Yang (2006) Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica Acta* 451:181-189.
- 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.
- Lee, S. H. and S. Wang (2006) Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites Part A* 37:80-91.
- Luo, S. and A. N. Netravali (1999) Interfacial and mechanical properties of environment-friendly green composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *Journal of Materials Science* 34:3709-3719.
- Ochi, S. (2006) Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A* 37:1879-1883.
- Saheb, D. N. and J. P. Jog (1999) Natural fiber polymer composites: A Review. *Advances in Polymer Technology* 18:351-363.
- Verhey, S. A., P. E. Laks and D. L. Richter (2001) The effect of composition on the decay resistance of model woodfiber-thermoplastic composites. In: *Proc., The Sixth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*. Madison, WI. pp. 79-86.
- Wu, J.-H., M.-J. Chung and S.-T. Chang (2005) Green color protection of bamboo culms using one-step alkali-pretreatment-free process. *Journal of Wood Science* 51:622-627.

