

研究報告

環氧樹脂 / 酚液化柳杉爲基質製作發泡體之性質

傅馨慧¹ 吳秋昌² 李文昭³

【摘要】本研究將柳杉木材以酚爲溶劑進行液化處理，另以雙酚A (Bisphenol A) 及環氧氯丙烷 (Epichlorohydrin) 爲原料合成環氧樹脂 (Epoxy resin)，所得環氧樹脂與酚液化木材分別以重量比 100/0、100/10、100/20、100/30混合，並添加三乙基四胺 (Triethylene tetramine) 爲架橋硬化劑，六甲基二矽氧烷 (Hexamethyldisiloxane) 爲發泡劑製作環氧樹脂發泡體。由試驗結果得知，此摻合樹脂可於常溫下發生放熱反應，並發泡、硬化而形成發泡體，其中以環氧樹脂爲原料者，其發泡體密度在 0.21 g/cm^3 以下，而隨液化木材添加量增加，發泡體密度提高；DSC熱分析顯示各摻合樹脂在形成發泡體過程已完全硬化，此發泡體在加熱過程出現相轉移現象，其中以環氧樹脂爲原料者之玻璃轉移溫度 (T_g) 約 120°C ，添加液化木材者則向低溫側偏移，然發泡劑添加量較多者則具有較高之 T_g 溫度；TGA熱重分析顯示環氧樹脂發泡體之熱裂解主要發生在 $250\sim 400^\circ\text{C}$ 之間，添加液化木材者在加熱至 700°C 時則有較高之焦炭率。

【關鍵詞】摻合樹脂、環氧樹脂、發泡體、酚液化柳杉。

Research paper

Properties of Foams Made with Matrixes Blended with Epoxy Resin and Phenol-liquefied *Cryptomeria japonica*

Sing-Huei Fu¹ Chiou-Chang Wu² Wen-Jau Lee³

【Abstract】 In this study, wood of *Cryptomeria japonica* was liquefied with phenol as a solvent and the epoxy resin was synthesized from epichlorohydrin and bisphenol A. The epoxy resin was mixed with phenol-liquefied wood by the weight ratio of 100/0, 100/10, 100/20 and 100/30, and the triethylene tetramine and hexamethyldisiloxane were added as the cross-linking hardener and foaming agent, respectively, to made epoxy foams. The results showed that these blended resins took an exothermic reaction under room temperature and formed epoxy foams by foaming and curing reaction. The foams made from pure epoxy resin as a raw material had the density lower than 0.21 g/cm^3 , but it increased with the

1. 國立中興大學森林學系大學部學生

Undergraduate student, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

2. 國立中興大學森林學系博士班研究生

Doctoral student, Department of Forestry, National Chung Hsing University

3. 國立中興大學森林學系教授；通訊作者；臺中市南區國光路250號

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

Corresponding Author. 250, Kuo Kuang Rd. Taichung, Taiwan, R.O.C.

Tel.: 04-22840345 ext 126; e-mail: wjlee@dragon.nchu.edu.tw

amount of liquefied wood added. DSC analysis showed that all of the foams had completely cured during the period of foaming process. The foams showed a phase-transferring phenomenon during the period of heating. The glass transition temperature (T_g) of epoxy resin foams appeared at about 120°C but it shifted to lower temperature when blended with liquefied wood. However, increasing the foaming agent, the foams had a higher T_g temperature. TGA analysis showed that the main thermo-degradation of various epoxy foams occurred at $250\text{--}400^\circ\text{C}$. The foams made from epoxy resin that blended with liquefied wood had a higher char yield as heating to 700°C .

【Key words】 Blending resin, Epoxy resin, Foams, Phenol-liquefied *Cryptomeria japonica*

一、前言

環氧樹脂為分子結構中具備環氧基之合成樹脂，常用者為利用環氧氯丙烷與雙酚A反應而得，為一分子鏈兩端具有高反應活性環氧基之熱塑性預聚合樹脂，添加架橋硬化劑時可進一步進行架橋連結反應，並形成三次元網狀結構之硬化樹脂；其具備儲存安定性佳、對填充物容許量大、膠合對象廣泛、硬化收縮小，硬化樹脂之機械强度高、耐水性、耐藥品、耐磨耗性佳、電絕緣性良好等諸多優點，因此被廣泛應用為膠合劑、塗料、成型材料，並應用於汽車工業、航空工業及建築工業等許多領域 (Motawie and Sadek, 1999)。

由於環氧樹脂被廣泛應用於航太工業及其他高科技產業，目前有許多研究乃針對其性質進行改良以符合現今對新材料之性能要求，其中耐熱性的改良深受重視，Jain *et al.* (2003) 曾探討環氧樹脂分子結構對其耐熱性之影響，Su *et al.* (2000) 則指出藉由環氧樹脂本身或硬化劑所導入之芳香環硬質結構可提高其耐熱性質，Duann *et al.* (2004) 及 Laza *et al.* (2005) 則透過酚化合物的導入以提高環氧樹脂之耐熱性質。又環氧樹脂價格較高，且雙酚A為一對人體有害的環境荷爾蒙，若能減少雙酚A使用量可提升其產品之安全性；而植物為一具備再生性特質之天然資源，其化學組成分之木質素為一酚類物質，Nonaka *et al.* (1997) 曾利用木質素製備複合型環氧樹脂；近年來則有學者將木質材料透過溶劑處理使其材料由固態轉化成液態，並將此液化木質材料與環氧樹脂混合，研

究結果顯示液化木材組成分可參與環氧樹脂之硬化反應，藉此方法可將生物質材料導入環氧樹脂結構中，並減少環氧樹脂所佔比例，此摻合樹脂亦可應用於木材膠合 (Kobayashi *et al.*, 2000; 2001; Kishi *et al.*, 2006; Asano *et al.*, 2007; Wu and Lee, 2010a; 2010b; 吳秋昌、李文昭, 2008a; 2009)。

發泡體為工業上應用非常廣泛的材料，藉由不同的原料樹脂及製程可獲得不同性能之發泡體，其中環氧樹脂發泡體為一熱硬化型結構用多孔性材，具備質量較輕、機械抵抗能力高、熱與化學穩定性佳、收縮率與吸水率低等諸多優點；Stefani *et al.* (2003; 2006; 2008) 指出在環氧樹脂中同時添加胺化合物及矽氧烷化合物，此胺化合物可與矽氧烷化合物作用釋放氫氣而使發泡，同時與環氧樹脂之環氧基行加成聚合反應，使樹脂高分子化而形成硬化之發泡體結構，康甄玲等人(2009)曾利用聚矽氧烷化合物為發泡劑製作環氧樹脂/酚液化柳杉摻合樹脂為基質之發泡體，然其發泡效果未臻理想，發泡體密度偏高。本研究則擬採用單分子之六甲基二矽氧烷為發泡劑，期藉由此低分子量化合物較高之反應性及單位重量下較多發泡劑分子以提高其發泡效果，並探討所製作酚液化柳杉/環氧樹脂發泡體之性質。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

以柳杉 (*Cryptomeria japonica*; Japanese cedar) 為液化用木材，伐採自國立台灣大

學實驗林溪頭營林區第3林班，樹齡為43年生；酚 (Phenol；聯工化學) 及硫酸 (Sulfuric acid; 95%_(aq)；聯工化學) 為液化藥劑，雙酚A (Bisphenol A; Hayashi Ind. Ltd.)、環氧氯丙烷 (Epichlorohydrin; Acros Organics Ltd.)、氫氧化鈉 (Sodium hydroxide; Choneye Chemical) 為環氧樹脂合成藥劑，三乙基四胺 (Triethylene tetramine; TETA; Choneye Chemical) 及六甲基二矽氧烷 (Hexamethyldisiloxane; Merck Ltd.) 分別為發泡體成型時之硬化劑及發泡劑。

(二) 柳杉木材之液化處理

將粒徑通過20 mesh 之柳杉木粉以105°C 加熱乾燥去除水分，液化處理時以酚為液化溶劑，酚/木材重量比3/1，並添加酚液化溶劑重5%之H₂SO₄為催化劑，攪拌，並以130°C 加熱反應60 min，所得液化產物之殘渣率、黏度及重量平均分子量分別為2.2%、7650 cps及1261。

(三) 環氧樹脂合成

將莫耳比5/1之環氧氯丙烷與雙酚A置於1000 mL四口圓底玻璃反應瓶，加熱至約110°C，以分液漏斗逐漸滴入濃度40%之NaOH_(aq) 1莫耳，全部反應時間5 h。反應液過濾去除NaCl，以減壓蒸餾除去水及未反應之環氧氯丙烷，所得環氧樹脂測定其環氧當量、不揮發分、黏度及分子量等性質 (吳秋昌、李文昭，2008b)，其值分別為269.3、92.5%、1096 cps及2586。

(四) 發泡體之製造

以環氧樹脂及酚液化柳杉為基質，二成分重量比分別為100/0、100/10、100/20、100/30，並添加環氧樹脂重20%之三乙基四胺為硬化劑，2~5%六甲基二矽氧烷為發泡劑，其中硬化劑之活性氫與環氧樹脂之環氧基比約為2/1。發泡體製作時先稱取計算量環氧樹脂及液化柳杉攪拌1 min，加入發泡劑再攪拌1 min，隨後加入設定量硬化劑攪拌1 min後倒入成型模具，於常溫下使自由發泡成型。

(五) 發泡特性分析

於前述所調配發泡體原料中插入電耦線，並以電子式測溫儀量測發泡、硬化過程之溫度經時變化，由發泡體重量及體積計算其密度，並以Panasonic Fx38數位相機拍攝其外觀及內部結構。

(六) 發泡體性質分析

1. FT-IR 結構分析：將發泡體磨粉，取通過100 mesh 之乾燥粉末為試樣，測定時採用儀器為 Perkin Elmer Spectrum 100 紅外線光譜儀，檢測方法為單點式全反射 (Attenuated total reflectance) 檢測法，設定解析度4 cm⁻¹，測定波數範圍650~4000 cm⁻¹，掃描次數4次。
2. 耐溶劑性分析：將發泡體磨碎，以60°C 真空烘箱乾燥，取約0.2 g 樣品，精秤之，加入20 mL 丙酮，靜置24 h，隨後以濾紙過濾，將殘留物以105±2°C 乾燥至絕乾，並計算重量保留率。
3. 壓縮強度試驗：發泡體規格為直徑39 mm 之圓柱體，以萬能強度試驗機 (Shimadzu; Autograph AG-X) 測定其壓縮強度，測定時載重速度1 mm/min，記錄載重過程之應力-應變，壓縮應力乃取試片發生5%形變量時之載重值除以試片橫斷面積計算而得，形變量則為試片在100 N、500 N、1000 N、2000 N 載重時之壓縮形變量對原試片高度之百分率，每一條件發泡體重複五個試驗樣品。
4. DSC 熱性質分析：採用儀器為 Perkin-Elmer DSC-7 熱示差掃描卡量儀，採熱掃描加熱模式，測試樣品重約0.5~1 mg，加熱槽內流動氣體為氮氣，加熱速度10°C/min，加熱溫度30~300°C，觀測其熱掃描加熱過程之熱流變化。
5. TGA 熱重分析：將發泡體研磨成粉，分析時採用儀器為 Perkin-Elmer Pyris 1 熱重量分析儀 (Thermogravimetric Analyzer; TGA)，試驗環境氣體為氮氣，以10°C/min 之升溫速率由室溫加熱至700°C，分析樣品在熱裂解過程之重量變化。

三、結果與討論

(一) 不同條件環氧樹脂發泡體之性質

圖1為不同組成條件環氧樹脂發泡過程之溫度變化，由圖可知其發泡、硬化過程為一放熱反應，A圖單純以環氧樹脂為原料比較發泡劑添加量之影響，其中發泡劑添加量5%者放熱反應較慢發生，然其最高溫可達180°C以上，而發泡劑添加量3.5%者較快發生放熱反應，硬化過程之最高溫度約120°C；B圖則在2%發泡劑添加量條件下比較液化木材添加量

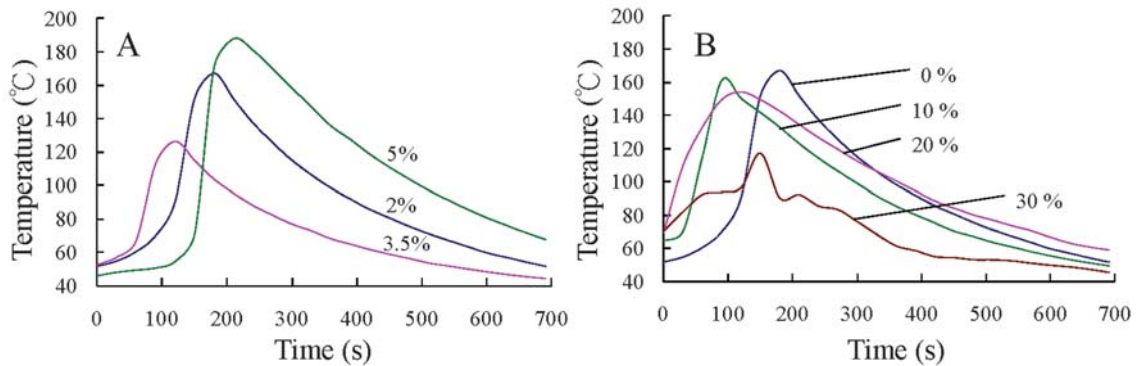


圖1. 不同組成條件環氧樹脂發泡過程之溫度變化；A：不同發泡劑添加量環氧樹脂；B：不同液化木材添加量摻合樹脂，發泡劑2%。

Fig. 1. Variation in temperature of epoxy resins prepared with various composition conditions during the period of foaming; A: Epoxy resin with different dosage of foaming agent; B: Blending resins with various liquefied wood amount; containing 2% of foaming agent.

矽氧烷化合物反應釋出氫氣而產生發泡效果 (Stefani *et al.*, 2003)，圖2為環氧樹脂及摻合樹脂發泡體之外觀型態及內部剖面圖，其中以環氧樹脂為原料所製作發泡體呈淡黃色，添加液化木材者則為棕褐色，剖面圖顯示環氧樹脂發泡體中存在許多孔隙，並以樹脂基質為骨架結構，而摻合樹脂中則存在構成泡體之薄膜。表1為不同條件發泡體之密度及丙酮溶出試驗之重量保留率，其中環氧樹脂發泡體之密度較低，隨酚液化木材添加量增加，發泡體密度提高，發泡劑添加量之影響則不明顯。經丙酮溶出試驗之重量保留率則以環氧樹脂發泡體較高，顯示其架橋結構較完整，然添加液化木材

對其溫度變化之影響，由圖顯示添加液化木材之摻合樹脂較早發生明顯之溫度變化，此可能因酚液化木材中存在之酚與胺硬化劑對其硬化反應產生協同作用而使其分子成長反應較快發生 (Gao and Yu, 2003)，其中液化木材添加量10%及20%者之最高溫與單純之環氧樹脂相似，然添加量30%者則較低，推測為較多液化木材添加條件下，環氧樹脂所占比例相對降低所致。

環氧樹脂可藉由所添加之胺硬化劑與聚

者在環氧樹脂/液化木材重量比100/30時其重量保留率仍在92.3%以上，此結果顯示摻合樹脂發泡體中酚液化木材大部份可參與樹脂之架橋硬化反應。

(二) FT-IR分析

圖3為六甲基二矽氧烷、環氧樹脂及發泡體之FT-IR光譜分析圖，其中環氧樹脂在3000~3600 cm^{-1} (A) 出現O-H伸縮振動吸收帶，1294 cm^{-1} (B)為環氧基 (Epoxy group) 中C-C及C-O之平面伸縮吸收峰，912 cm^{-1} (C)為環氧基中C-C伸縮振動吸收峰；而發泡劑六甲基二矽氧烷在2955 (D) cm^{-1} 則出現C-H振動吸收峰，1252 cm^{-1} (E)為Si-CH₃彎曲振動吸收峰，

表1.不同組成條件發泡體之性質

Table 1. Properties of foams made with various composition conditions

環氧樹脂/ 液化柳杉 (重量比)	TETA ^a (%)	發泡劑 ^a (%)	密度 (g/cm ³)	重量 保留率 ^b (%)
100/0	20	2.0	0.17	94.2
		3.5	0.17	97.0
		5.0	0.21	96.8
100/10	20	2.0	0.24	95.7
		3.5	0.35	94.2
		5.0	0.31	95.5
100/20	20	2.0	0.40	95.5
		3.5	0.40	95.2
		5.0	0.37	93.7
100/30	20	2.0	0.50	92.3
		3.5	0.50	92.5
		5.0	0.41	92.6

^a 對環氧樹脂重。

^b 丙酮溶出試驗。

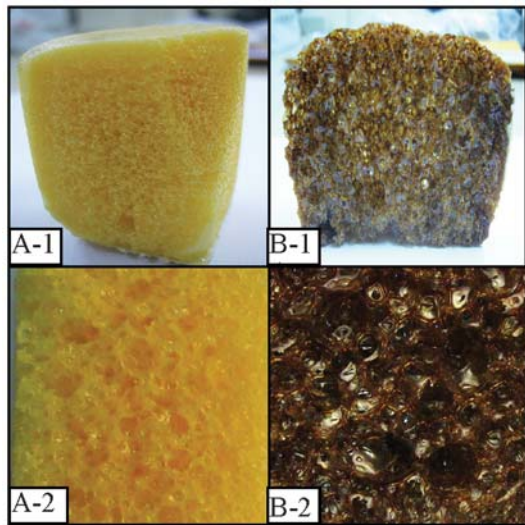


圖2. 環氧樹脂發泡體之外觀圖及剖面圖；A、B分別為環氧樹脂及摻合樹脂；1、2分別為外觀圖及剖面圖。

Fig. 2. Appearance and profile images of epoxy foams; A and B were epoxy resin and blending resin, respectively; 1 and 2 were appearance and profile images, respectively.

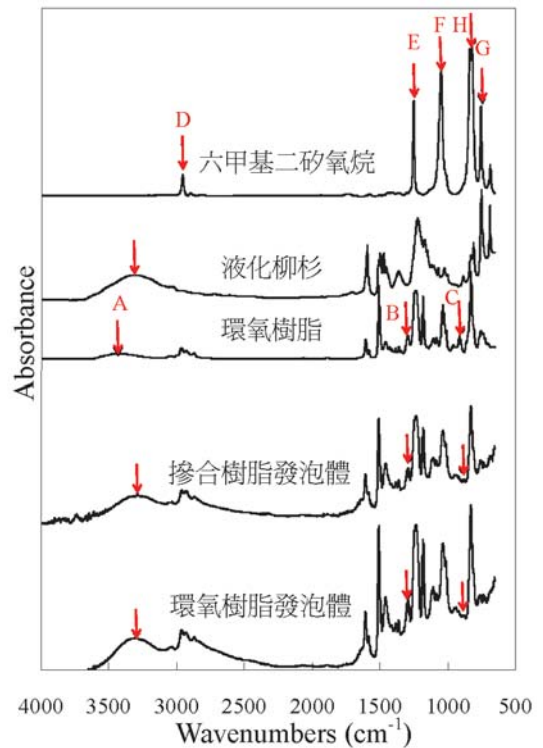


圖3. 發泡體及其原料FT-IR分析圖。

Fig. 3. FT-IR spectra of foams and their raw materials.

1052 cm⁻¹ (F)及751 cm⁻¹(G)為 Si-O-Si 對稱型與非對稱型伸縮振動吸收峰，而830 cm⁻¹(H) 則出現了Si-CH₃伸縮振動吸收峰。而環氧樹脂與摻合樹脂所製作發泡體則有相似之吸收光譜圖，而與單純之環氧樹脂比較，其中 O-H 振動吸收帶強度明顯增強，而912 cm⁻¹(C) 屬於環氧基中 C-C伸縮振動吸收峰強度則減弱，顯示發泡體中環氧樹脂的環氧基開環而形成羥基。

(三) 發泡體之壓縮強度

本研究所製作發泡體為一硬質發泡體，表 2 為不同條件環氧樹脂為基質發泡體之壓縮彈性係數、在5%及10%形變量時之壓縮應力，及其在不同載重下之應變；其中酚液化木材添加 10%及20%者彈性係數較單純環氧樹脂者高，添加量提高至30%時其彈性係數明顯降低，此可能在10%及20%添加量條件下，液化木材導入之酚結構可提高發泡體之剛性，然添加量提

高至30%時，部份液化木材組成成分無法完全參與反應而殘留，此殘留之液化木材如同結構中之可塑劑而降低其剛性 (Wu and Lee, 2010b)；而發泡劑添加量由2.0%增加至3.5%時其彈性係數增加，但再提高至5.0%則效果較不明顯。另比較發泡體壓縮至5%形變量時之壓縮應力，其中添加液化木材者於單純環氧樹脂所製造

者；又比較不同載重下發泡體產生之應變，在500 N載重以下添加液化木材者有較大應變；但隨載重增加，以環氧樹脂為原料者其發泡體之應變大幅增加，然添加液化木材者應變增加明顯較小，此進一步顯示液化木材之添加可提供發泡體較剛硬之特性，其中並以添加量20%者形變量變化較小。

表2. 不同組成條件環氧樹脂發泡體之壓縮特性

Table 2. Compression properties of epoxy foams made with various composition conditions

環氧樹脂/ 液化柳杉 (重量比)	發泡劑 (%)	密度 (g/cm ³)	彈性 係數 (MPa)	壓縮應力 (MPa) (5%應變)	應變 (%)			
					100N 載重	500N 載重	1000N 載重	2000N 載重
100/0	2.0	0.17	13.85±1.77	0.68±0.12	1.39	3.15	20.31	49.70
	3.5	0.17	18.36±3.16	0.69±0.03	1.33	2.67	17.53	47.86
	5.0	0.21	17.09±3.79	0.68±0.05	1.22	2.61	4.90	34.38
100/10	2.0	0.24	16.66±4.34	- ^a	2.05	3.14	3.45	- ^b
	3.5	0.35	22.38±0.91	1.18±0.33	2.46	3.52	4.48	8.45
	5.0	0.31	25.52±6.37	0.80±0.51	2.41	2.73	3.52	7.13
100/20	2.0	0.40	22.41±2.71	1.62±0.32	2.58	3.10	3.43	5.54
	3.5	0.40	25.51±2.26	1.42±0.43	1.67	2.58	3.30	3.52
	5.0	0.37	25.92±2.58	0.99±0.00	2.02	2.78	3.54	- ^b
100/30	2.0	0.50	14.92±0.82	1.29±0.20	1.84	2.79	4.04	6.28
	3.5	0.50	15.24±3.35	0.79±0.36	2.45	4.15	5.52	7.48
	5.0	0.41	15.26±2.28	0.77±0.20	2.40	3.83	6.77	12.77

^a 發泡體在5%應變前已破壞

^b 發泡體在達載重2,000 N前已破壞

(四) DSC熱性質分析

圖4為不同組成條件環氧樹脂發泡體之DSC熱分析圖，由圖顯示其熱流曲線在兩個溫度區域發生較明顯變化，在130°C附近所出現之熱流曲線微躍升現象應為其由玻璃態轉變為橡膠態之相轉變所造成，在約220°C以上熱流曲線明顯向上飄移則應為發生熱裂解現象所致。表3則為其DSC熱分析參數，由表顯示其相轉移之起始溫度 (Onset) 及玻璃轉移溫度 (T_g) 皆隨著酚液化木材添加量增加而向低溫側偏移；而熱裂解之起始溫度與液化木材添加量

間則無明顯關係。

(五) TGA熱重損失分析

圖5為不同發泡劑添加量環氧樹脂發泡體之TGA及DTG分析圖，其熱重損失主要發生在約250-400°C之間，其中發泡劑添加量3.5%者熱裂解重量損失曲線略偏向高溫側，且最快速熱裂解之溫度較高，顯示其耐熱性優於較其他兩種發泡劑添加量者，此結果與前述具備較佳之耐溶劑重量保留率及較高之彈性係數之結果相似。圖6為不同液化木材添加量環氧樹脂發泡體之TGA及DTG分析圖，其中添加液化木材

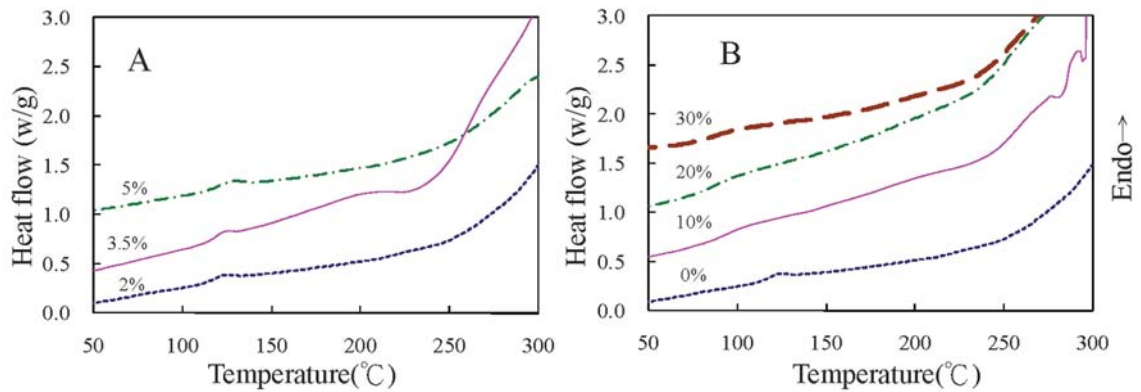


圖4. 不同組成條件環氧樹脂發泡體之DSC熱分析圖；A：不同發泡劑添加量環氧樹脂；B：不同液化木材添加量摻合樹脂，發泡劑2%。

Fig. 4. DSC curves of epoxy resins with various composition conditions; A: Epoxy resin with different dosage of foaming agent; B: Blending resins with various liquefied wood amount; containing 2% of foaming agent.

表3. 不同組成條件環氧樹脂發泡體之DSC熱分析參數

Table 3. DSC thermo-analysis parameters of epoxy foams made with various composition conditions

環氧樹脂/ 液化柳杉 (重量比)	發泡劑 (%)	I ^a			II ^b
		Onset (°C)	End (°C)	Tg (°C)	Onset (°C)
100/0	2.0	115	122	120	247
	3.5	115	123	120	239
	5.0	118	126	122	240
100/10	2.0	90	106	104	242
	3.5	90	106	104	337
	5.0	94	110	106	235
100/20	2.0	79	100	90	251
	3.5	79	100	90	242
	5.0	71	98	98	238
100/30	2.0	69	93	84	245
	3.5	71	81	77	252
	5.0	71	86	86	238

^a 相轉移

^b 熱裂解

者在較低溫側即開始發生熱裂解重量損失，且DTG圖顯示其重量損失發生溫度範圍較廣，最快速熱裂解溫度較低，此可能因其結構中含有木材組成成分所致，然其加熱至400°C後之重量保留率則較高，推測為其中所含木質素形成焦

炭所致。

又由其TGA及DTG曲線將熱裂解行為進一步區分為四個階段，第一階段為開始熱裂解區域，第二階段為快速熱裂解區域，第三階段為急速熱裂解區域，第四階段則為更高溫處之

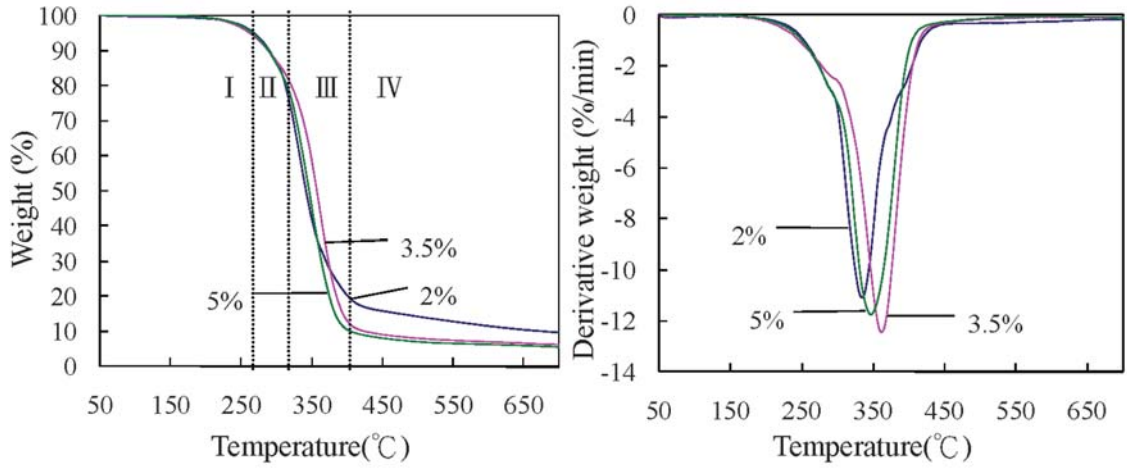


圖5. 不同發泡劑添加量環氧樹脂發泡體之TGA及DTG分析圖。

Fig. 5. TGA and DTG curves of epoxy resin foams made with various dosage of foaming agent.

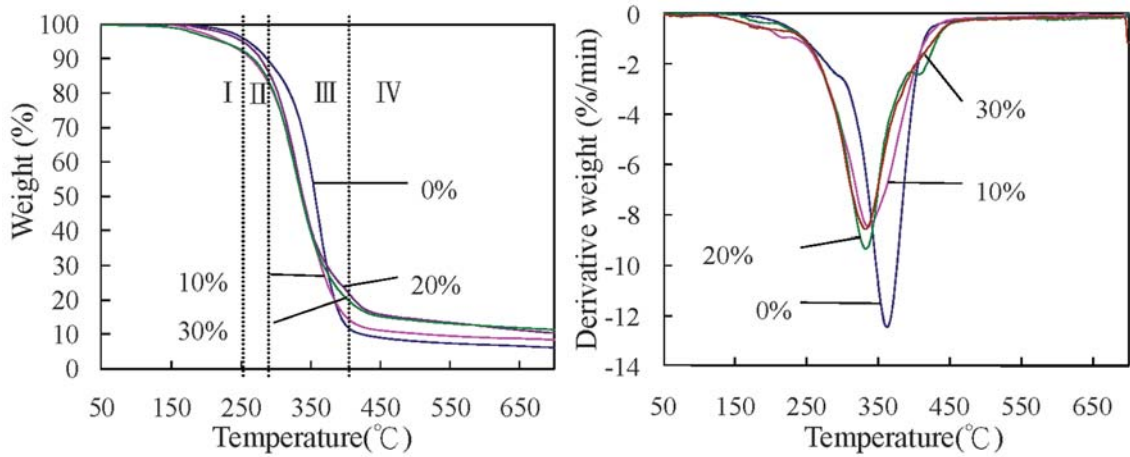


圖 6. 不同液化木材添加量環氧樹脂發泡體之TGA及DTG熱分析圖。

Fig. 6. TGA and DTG curves of epoxy resin foams made with various liquefied wood amount.

微量重量損失區域，表4則為此四個階段之起始溫度及重量損失率，其中環氧樹脂發泡體起始重量損失發生溫度較高，且隨發泡劑添加量增加此溫度向高溫側偏移，而摻合樹脂發泡體則有較低之起始重量損失發生溫度，推測為液化木材中部分未參與反應之低分子量組成分氣化所造成；第二階段開始發生較明顯之重量損失，此階段發生溫度在245~267°C之間，主要為發泡體中硬化樹脂之側鏈開始產生熱解；第三階段急速之重量損失則為發泡體中硬化樹脂

之主鏈結構大量產生熱裂解所致，其中添加液化木材者此階段之起始溫度及最大重量損失速率溫度較低；第四階段則為焦炭化樹脂持續發生脫氫或脫氧反應造成之重量損失。而加熱至700°C之焦炭率則隨液化木材添加量增加而提高。

四、結論

本研究將雙酚A型環氧樹脂與酚液化柳杉木材混合，並添加六甲基二矽氧烷為發泡劑，

表4. 不同組成條件環氧樹脂發泡體之TGA熱重損失參數

Table 4. TGA thermo-analysis parameters of epoxy foams made with various composition conditions.

環氧樹脂/ 液化柳杉 (重量比)	發 泡 劑 (%)	I		II		III				IV		
		Onset (°C)	重量 損失率 (%)	Onset (°C)	重量 損失率 (%)	Onset (°C)	重量 損失率 (%)	Peak 溫度 (°C)	重量損 失速率 (%/mm)	Onset (°C)	重量 損失率 (%)	焦炭率 (%)
100/0	2.0	168	2.2	259	12.8	307	67.1	334	11.1	403	8.1	9.7
	3.5	199	3.7	263	13.8	322	71.3	362	12.4	396	4.9	6.2
	5.0	203	3.1	264	17.2	319	69.0	346	11.7	387	5.7	5.0
100/10	2.0	153	3.6	255	13.8	303	66.8	337	9.5	410	4.5	11.1
	3.5	149	8.3	260	11.7	301	67.0	336	8.5	401	4.5	8.5
	5.0	159	1.3	245	13.9	304	69.6	357	8.3	406	5.7	9.5
100/20	2.0	151	2.3	250	9.7	296	74.0	335	9.4	403	4.3	9.7
	3.5	172	5.1	266	14.4	304	63.1	333	9.3	420	6.8	10.5
	5.0	165	5.7	266	13.9	304	65.3	336	10	402	4.6	10.1
100/30	2.0	160	5.4	254	10.7	299	67.1	332	8.8	390	5.1	11.6
	3.5	152	7.3	262	11.7	299	63.7	332	8.6	399	5.8	11.3
	5.0	153	7.1	267	14.9	306	62.2	335	8.8	400	4.9	10.6

由結果得知此摻合樹脂可應用於硬質環氧樹脂發泡體製作，其發泡過程為一放熱反應，然隨液化木材添加量增加，其發泡效果降低，發泡體密度則增加。液化木材添加量10%及20%所製作發泡體之彈性係數高於環氧樹脂，添加量30%時則彈性係數降低，然在高載重負荷下，添加液化木材之發泡體有較佳之變形抵抗能力。DSC分析顯示隨液化木材添加量增加，其發泡體之玻璃轉移溫度向低溫側偏移；TGA熱重分析顯示此環氧樹脂發泡體之熱裂解主要發生在250-400°C之間，而添加酚液化木材者在加熱至700°C時有較高之焦炭率。

五、參考文獻

吳秋昌、李文昭 (2008a) 多元醇液化麻竹-環氧樹脂製備聚摻合樹脂之膠合性能。林產工業 27 : 31-40。
 吳秋昌、李文昭 (2008b) 胺硬化劑添加量對雙酚A型環氧樹脂之膠化性及膠合性能之影

響。中華林學季刊 41 : 121-133。

吳秋昌、李文昭 (2009) 多元醇液化木質材料-環氧樹脂之反應特性及其硬化樹脂之熱性質。林產工業 28 : 1-12。
 康甄玲、吳秋昌、李文昭 (2009) 環氧樹脂/酚液化柳杉摻合樹脂製作環氧發泡體。林產工業 28 : 177-188。
 Asano, T., M. Kobayashi, B. Tomita and M. Kajiyama (2007) Syntheses and properties of liquefied products of ozone treated wood/epoxy resins having high wood contents. *Holzforschung* 61:14-18.
 Duann, Y.F., T.M. Liu, K.C. Cheng and W.F. Su (2004) Thermal stability of some naphthalene- and phenyl-based epoxy resins. *Polym. Degrad. Stabil.* 84:305-310.
 Gao, Y and Y. Yu (2003) The synergistic effect of dicyandiamide and resorcinol in the curing of epoxy resins. *J. Appl. Polym. Sci.* 89:1869-

- 1874.
- Jain, P., V. Choudhary and I.K. Varma (2003) Effect of structure on thermal behaviour of epoxy resins. *Eur. Polym. J.* 39:181-187.
- Kishi, H., A. Fujita, H. Miyazaki, S. Matsuda and A. Murakami (2006) Synthesis of wood-based epoxy resins and their mechanical and adhesive properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 102:2285-2292.
- Kobayashi, M., K. Tukamoto and B. Tomita (2000) Application of liquefied wood to a new resin system-synthesis and properties of liquefied wood/epoxy resins. *Holzforschung* 54:93-97.
- Kobayashi, M., Y. Hatano and B. Tomita (2001) Viscoelastic properties of liquefied wood/epoxy resin and its bond strength. *Holzforschung* 55:667-671.
- Laza, J.M., J.L. Vilas, M.T. Garay, M. Rodriguez and L.M. Leon (2005) Dynamic mechanical properties of epoxy-phenolic mixtures. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 43:1548-1555.
- Motawie, A.M. and E.M. Sadek (1999) Adhesives and coatings based on phenolic/epoxy resins. *Polym. Adv. Technol.* 10:223-228.
- Nonaka, Y., B. Tomita and Y. Hatano (1997) Synthesis of lignin/epoxy resins in aqueous systems and their properties. *Holzforschung* 51:183-187.
- Stefani, P.M., A.T. Barchi, J. Sabugal and A. Vazquez (2003) Characterization of epoxy foams. *J. Appl. Polym. Sci.* 90:2992-2996.
- Stefani, P.M., V. Cyras, A. Tejeira Barchi and A. Vazquez (2006) Mechanical properties and thermal stability of rice husk ash filled epoxy foams. *J. Appl. Polym. Sci.* 99:2957-2965.
- Stefani, P.M., C.J. Perez, V.A. Alvarez and A. Vazquez (2008) Microcellulose fibers-filled epoxy foams. *J. Appl. Polym. Sci.* 109:1009-1013.
- Su, W.F.A., K.C. Chen and S.Y. Tseng (2000) Effects of chemical structure changes on thermal, mechanical, and crystalline properties of rigid rod epoxy resins. *J. Appl. Polym. Sci.* 78:446-451.
- Wu, C.C. and W.J. Lee (2010a) Synthesis and properties of copolymer epoxy resins prepared from copolymerization of bisphenol A, epichlorohydrin and liquefied *Dendrocalamus latiflorus*. *J. Appl. Polym. Sci.* 116:2065-2073.
- Wu, C.C. and W.J. Lee (2010b) Curing and thermal properties of copolymer epoxy resins prepared by copolymerized bisphenol-A and epichlorohydrin with liquefied *Dendrocalamus latiflorus*. *Polymer J.* 42:711-715.