

研究報告

不同溫度熱處理柳杉與相思樹木材之特性

郭瑋玲¹ 盧崑宗²

【摘要】本研究係以無毒之熱處理技術，擬改善木材尺寸安定性。材料為20—30年生，厚度5 cm之柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 與相思樹 (*Acacia confusa*)，含水率12%；利用炭化爐，通入N₂，在升溫速率20°C/hr下，分別加熱至130、160、190、220、250及280°C，並持溫2 hr進行熱處理，探討不同溫度熱處理材之質量損失、密度、平衡含水率、尺寸減低率、色差值、粗糙度、尺寸安定性、接觸角、硬度、抗彎強度及傅立葉紅外線光譜 (FT-IR) 分析。試驗結果顯示，柳杉與相思樹木材經不同溫度熱處理後，質量損失隨處理溫度提高而增加，而密度與平衡含水率明顯降低；色差值 (ΔE^*) 隨熱處理溫度之提升而增加，表面粗糙度經熱處理後則較為平滑；抗膨脹效能 (Anti-swelling efficiency, ASE) 與抗吸濕效能 (Moisture excluding efficiency, MEE) 隨熱處理溫度提高有明顯之改善效果。柳杉與相思樹材經熱處理後，木材表面具較佳疏水性，且會隨熱處理溫度升高而增加。在熱處理材之表面硬度方面，柳杉木材以220°C以下處理之硬度值較未處理材高，且會隨溫度升高而增加，而相思樹木材以190°C以下處理之硬度值較未處理材為高，但以190°C以上熱處理硬度則明顯降低。兩種木材之抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 均隨熱處理溫度增加而降低，但柳杉與相思樹之抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE) 分別以溫度160與190°C熱處理者最佳。在傅立葉紅外線光譜 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 分析顯示，經熱處理後木材半纖維素及纖維素含量明顯減少，且隨處理溫度增加而降低更多，但木質素相對含量則隨處理溫度增加而提高。

【關鍵詞】柳杉、相思樹、熱處理材、尺寸安定性

Research paperCharacteristics of *Cryptomeria japonica* and *Acacia confusa*
Heat-Treated Woods with Different TemperaturesWei-Ling Kuo¹ Kun-Tsung Lu²

【Abstract】In this study, a non-toxic heat-treated technology was applied for improving the dimensional stability of wood. A 20-30 years old *Cryptomeria japonica* and *Acacia confusa* wood with thickness of 5 cm and moisture content of 12% were used. The heat treatment was conducted using an activated furnace under N₂ atmosphere and the samples were subjected to heat treatment at 130, 160, 190, 220, 250, and 280°C, respectively at a heating rate of 20°C/hr and holding time of 2 hr. The characteristics of heat-treated wood

1. 國立中興大學森林學系碩士，台中市402國光路250號。

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

2. 國立中興大學森林學系教授，台中市402國光路250號。通訊作者。(lukt@dragon.nchu.edu.tw)。

Professor, Department of forestry, National Chung-Hsing University, Taiwan, Corresponding author.

such as mass loss, moisture content, density, shrinkage ratio, color change, roughness, dimensional stability contact angle, surface hardness, static bending strength as well as Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis were examined. The results showed that the mass loss and color difference (ΔE^*) of heated-treated wood increased with increasing heated temperatures, while the moisture content and density had the reverse results. Furthermore, after heated treatment the smoother surface of wood was obtained. The anti-swelling efficiency (ASE) and moisture excluding efficiency (MEE) could be improved significantly at higher heat-treated temperatures. The surface hardness of below 220°C heat-treated *C. japonica* wood was higher than that of un-treated wood. The surface hardness of below 190°C heat-treated *A. confusa* wood was higher than that of un-treated wood, while the hardness decreased significantly for the one over 190°C treatment. The modulus of rupture (MOR) of wood with over 190°C treatment decreased with increasing heated temperatures. However, *C. japonica* and *A. confusa* with 160 and 190°C treatment had the highest modulus of elasticity (MOE). According to FT-IR, the contents of hemicellulose and cellulose of treated wood were lower than those of untreated wood, and which decreased with increasing heated temperatures. But the relative content of lignin increased with increasing heated temperatures.

【Key words】 *Cryptomeria japonica*, *Acacia confusa*, Heated treatment wood, Dimensional stability.

一、前言

近年來，隨全球環保意識抬頭，可再生性材料漸漸受到重視。木材自然的溫暖性，適度的柔軟性以及特有的材質感，自古以來木材就被廣泛用於室內外結構材料、家具、地板及窗框等利用，且為可再生性環保材料。然而木材由纖維素、半纖維素、木質素及少量抽出成分等共同組成，組織複雜，各別變異性大，且木材具多孔性、異方性及吸濕特性，使木材易產生收縮膨脹，造成彎曲、表面裂、蜂巢裂、腐朽變色及劣化，這些變質因素均會顯著降低木製品的品質。因此，提升木材尺寸安定性及防腐效能，將為拓展木材應用範圍之方法。傳統上會使用化學處理法（如酯化、醚化等）改善木材尺寸安定性 (Ramsden *et al.*, 1997; Chang and Chang, 2006)，以鉻化砷酸銅 (Chromated copper arsenate, CCA) 或銅烷基銨化合物 (Alkaline copper quaternary ammonium compounds, ACQ) 等防腐劑增加木材之防腐性能 (Shi *et al.*, 2007)，達改善木材耐久性之目的，但所使用化學藥劑對人體及環境均會造成危害。近來，世界各國積極重視環境議題，並

開始限制有害化學藥劑應用於木材上，所以進一步發展無毒性木材改良方法，因此木材熱處理技術受到重視。

熱處理技術主要以不銹鋼製炭化爐，在 150~230°C 之高溫下，適度通入水蒸氣，使木材組成份產生化學變化而達改質之目的。熱處理技術可取代化學藥劑之使用，可有效改變木材之基本性質及機械性質，例如密度、平衡含水率、尺寸安定性，抗彎曲性及硬度等，且木材經熱處理後，具有防腐及抗生物侵入功能外，尺寸較穩定而不易變形及開裂，外表較具美觀、耐久、環保等特性。在中世紀時期芬蘭、荷蘭及德國對於熱處理技術已有完整之規劃，目前在歐洲及中國已興起利用此對環境友善之熱處理技術 (周永東等人, 2006; Gunduz and Aydemir, 2009; Hakkou *et al.*, 2005; Metsä-Kortelainen *et al.*, 2006; Hakkou *et al.*, 2006; Akyildiz and Ates, 2008; Manninen *et al.*, 2002; Del Menezzi *et al.*, 2008; Gobakken and Westin, 2008)，以改善木材收縮膨脹及耐久性，並有效增加木材應用範圍。然而各種木材之組織構造性質差異甚大，熱處理材之性質與熱處理

條件 (例如最終加熱溫度、升溫速率、持溫時間、調節處理等) 有關 (Kocafe *et al.*, 2009), 要取得最佳效能之熱處理材, 須依材料及用途不同而選擇最適合之熱處理條件。

柳杉 (*C. japonica*) 與相思樹 (*A. confusa*) 為台灣人工林造林木之主要樹種, 林務局調查統計 (2005), 柳杉及相思樹人工林的造林面積分別為39,100及21,200公頃, 分別佔造林面積的2.68與1.43%, 蓄積量極為豐富。柳杉為日治時代引進台灣的主要造林樹種, 栽植於中海拔山區的伐木跡地, 又柳杉材質輕軟, 富彈性, 且有香氣等優點。另外, 相思樹則屬於耐旱、防風的熱帶樹種, 在日治時代因燃料的需求, 於是在全台灣的低海拔山坡普遍栽植。相思樹材質地堅硬, 耐衝擊摩擦等優點 (王松永, 1983)。故此兩種木材為值得開發並增進其價值之天然資源。本研究為探討熱處理對此兩種代表針葉樹與闊葉樹材性質之影響, 將柳杉與相思樹木材利用機械碳化爐, 通入 N_2 , 在升溫速率 $20^\circ C/hr$ 下, 分別加熱至130、160、190、220、250及 $280^\circ C$, 並持溫2 hr進行熱處理, 探討不同熱處理溫度對熱處理材性質之影響。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

採自中興大學惠蓀林場20~30年生之柳杉 (*C. japonica*) 與相思樹 (*A. confusa*) 材。試材經氣乾後, 裁切成試驗所需尺寸, 再於恆溫恆濕機($20^\circ C$ 、65% RH)中調濕一週後備用。

(二) 試驗方法

1. 木材熱處理

將含水率約12%之50 mm (T)×50 mm (R)×330 mm (L) 柳杉與相思樹材, 置於內部體積為 $10,000 m^3$ 之大型機械式碳化爐中。先以500 mL/min通入 N_2 , 經30 min後將 N_2 通入速率調至50 mL/min。在升溫速率 $20^\circ C/hr$ 下, 由室溫升至 $100^\circ C$, 持溫6 hr, 再以相同升溫速率分別升至130、160、190、220、250及 $280^\circ C$ 後, 並持溫2 hr且持續通入 N_2 , 試驗終了冷卻至室

溫, 即得不同溫度熱處理材。

2. 熱處理材性質分析

(1) 質量損失率: 未處理材之絕乾質量 (W_0), 以不同條件進行熱處理後, 待降至室溫後, 量測熱處理材之質量, 並計算其絕乾質量 (W_1), 以下式計算質量損失率 (Weight loss, WL)。

$$WL (\%) = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$$

式中, W_0 : 未處理材之絕乾質量 (g), W_1 : 熱處理材之絕乾質量 (g)。

(2) 含水率: 依CNS 452木材含水率試驗法試驗之。

(3) 密度: 依CNS 451木材密度試驗法試驗之。

(4) 尺寸減低率: 將30 mm (T)×30 mm (R)×5 mm (L) 之試材移至調濕環境 ($65 \pm 5\%$ RH, 溫度 $20 \pm 2^\circ C$), 調濕至平衡含水率, 分別量測弦向、徑向及縱向長度。經不同條件熱處理過後, 再量測弦向、徑向及縱向長度, 以下式計算出各切面之尺寸減低率 (α)。

$$\alpha (\%) = \frac{r_0 - r_1}{r_0} \times 100$$

式中, r_0 : 未處理試材長度 (mm), r_1 : 熱處理試材的長度 (mm)。

(5) 色差值: 將熱處理前後試材之弦切面, 以分光式色差計 (Minolta co. CM-3600d) 測量試材表面顏色, 採D65光源, 偵測角度 10° , 孔徑為8 mm。依1976年國際照明協會 (CIE) 的CIE LAB色彩體系, 由電腦軟體計算求得 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 、 H^* 五個色彩參數, 試材表面顏色變化以明度差值 (Brightness difference, ΔL^*)、紅綠軸差值 (Δa^*)、黃藍軸差值 (Δb^*) 及色差值 (Color difference, ΔE^*) 表示。每個試材測定3點, 再平均之。

(6) 表面粗糙度: 以針觸式表面粗糙度測定儀

(Kosaka SE1700) 量測木材弦切面平行木理者，觸針直徑2 μm ，測量長度24 mm，測量速度1.0 mm/sec，截取高度 (Cut off) 為8 mm。分別測定：a. 中心線平均粗糙度 (Ra)、b. 最大粗糙度 (Ry)、c. 十點平均粗糙度 (Rz)。

(7) 尺寸安定性

a. 浸水試驗：依Lu與Lin (2008) 之木材浸水試驗法試驗之。先將30 mm (T)×30 mm (R)×10 mm (L) 尺寸之試材置於105 \pm 3°C 烘箱中，達絕乾後，量測體積與重量並記錄之，再將試材浸於蒸餾水中，減壓抽真空維持30 min後，回復常壓維持1 hr，再進行減壓，維持30 min後，回復常壓維持1 day，置換新的蒸餾水，重複上述步驟至第7 day結束試驗，量測試材在濕潤狀況下之體積與重量，並依下列公式計算試材之體積膨脹率 (Volumetric swelling coefficient, S)、抗膨脹效能 (Antiswelling efficiency, ASE) 與吸水率 (Water absorption percent, WAP)，每種條件均進行6重複。

$$S (\%) = \frac{V_w - V_0}{V_0} \times 100$$

式中， V_w ：試材於飽水狀態下體積 (cm^3)， V_0 ：試材絕乾體積 (cm^3)。

$$ASE (\%) = \frac{S_c - S_t}{S_c} \times 100$$

式中， S_c ：未處理材之體積膨脹率 (%)， S_t ：熱處理材體積膨脹率 (%)。

$$WAP (\%) = \frac{W_w - W_0}{W_0} \times 100$$

式中， W_w ：試材於飽水狀態的重量 (g)， W_0 ：試材的絕乾重量 (g)。

b. 吸濕性試驗：依CNS 6715木材吸濕性試驗法試驗之。

(8) 接觸角測定：取熱處理前後之橫切面、弦切

面與徑切面木材，使用蒸餾水做為滴液，以表面接觸角測定儀 (Kyowa) 測定15 sec內之接觸角，每試驗片均進行6重複。

(9) 硬度：依CNS 460木材硬度試驗法試驗之。

(10) 抗彎強度 (Static bending strength)：依CNS 454木材抗彎試驗法試驗之。

(11) 傅立葉紅外線光譜 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 分析：使用儀器為Perkin Elmer (Spectrum 100, USA) 傅立葉轉換紅外線光譜儀，以木粉進行全反射 (Attenuation total reflectance, ATR) 檢測模式分析，檢測器為FR-DTGS (Deuterated triglycine sulphate)，光譜波數 (Wavenumber) 範圍為4,000-650 cm^{-1} ，所使用之掃描解析度為4 cm^{-1} ，掃描次數為32次。

(12) 統計分析：將各項性質試驗各進行重複後，其數據使用SAS軟體 (Version 9.2, SAS Institute, Cary, USA) 進行鄧肯氏多變異分析 (Duncan's multiple range test)，比較其信賴水準95%以上之差異顯著性。

三、結果與討論

(一) 質量損失、含水率及密度變化

柳杉與相思樹材經不同溫度熱處理後之質量損失、含水率及密度變化如表1所示。柳杉與相思樹材質量損失率會隨熱處理溫度之升高而增加，其中以最高溫280°C熱處理後，質量損失分別達到49.58與35.69%，此應除了吸著水之散失外，抽出成分揮發及大部分半纖維素與部分纖維素產生熱裂解所致。在含水率方面，柳杉與相思樹材經熱處理後之含水率隨溫度升高而降低，其中以280°C處理木材含水率最低，此表示即便在280°C高溫熱處理下仍有少量水分子吸著，因含水率是水分子一層層吸附於木材親水性官能基如-OH、-COOH基之總合，而經熱處理後，即使在相當乾燥的條件下，第一層水分子仍不易脫離 (劉正宇、盧崑宗，2002)。

柳杉與相思樹材經熱處理後，因水分散失

及組成分之熱裂解或揮發，木材密度也隨之降低，由表1顯示，未處理柳杉與相思樹材之密度有些許差異，但隨熱處理溫度之升高，密度降低率隨之增加。又在相同處理溫度下，柳杉材經熱處理者之密度降低率均大於相思樹材，例如280°C熱處理下，柳杉與相思樹材密度降低率分別為31.23與15.87%，此為在熱處理過程中，低比重木材水分散失更加顯著，且木材

受熱均勻，組成分產生大量熱裂解所致。另外，低比重木材之細胞腔較大，細胞壁較薄，在熱處理過程中，會較高比重木材產生大量之裂解，而質量損失情形較為明顯所致(林仁政，1997；Vick, 1999)。Kamdem等人(2002)將雲杉與山毛櫸以200~260°C，經1~24 hr熱處理後，試驗結果熱處理雲杉材之密度降低率會較熱處理山毛櫸材大，其值分別為15與1%。

表1. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材質量損失、含水率、密度

Table 1. Mass loss, moisture content and density of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Mass loss (%)	Moisture content (%)	Density		
				Untreated wood (kg/m ³)	Treated wood (kg/m ³)	Decrease in density (%)
<i>C. japonica</i>	Control	—	12.00	438 ± 10	—	—
	130	8.51	7.53 ± 0.22	439 ± 31	433 ± 10	1.23
	160	7.76	5.46 ± 0.26	448 ± 24	427 ± 14	4.63
	190	10.95	5.36 ± 0.11	430 ± 23	407 ± 17	5.45
	220	18.74	5.05 ± 0.14	422 ± 20	397 ± 17	6.00
	250	24.78	2.01 ± 0.06	454 ± 35	385 ± 30	15.15
	280	49.58	1.12 ± 0.17	433 ± 26	298 ± 8	31.23
<i>A. confusa</i>	Control	—	12.00	804 ± 51	—	—
	130	0.00	3.08 ± 0.27	747 ± 56	741 ± 62	0.85
	160	0.07	2.62 ± 0.21	830 ± 37	817 ± 13	1.63
	190	1.15	1.39 ± 0.20	758 ± 15	745 ± 37	1.75
	220	6.50	0.69 ± 0.10	827 ± 69	789 ± 76	4.69
	250	17.59	0.36 ± 0.14	776 ± 31	739 ± 33	4.89
	280	35.69	0.32 ± 0.02	888 ± 32	747 ± 29	15.87

(二) 尺寸減低率

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材弦向、徑向及縱向之尺寸減低率如表2所示；試驗結果顯示柳杉材經熱處理後，以弦向收縮最為明顯，且隨溫度升高而增加，而徑向減低率次之，縱向者為最低；而相思樹材經熱處理過後，三切面之尺寸減低率結果與柳杉材者相

似。另外，以相同溫度(220°C以上)進行熱處理後，可發現柳杉熱處理材弦向之尺度減低率較相思樹材為大，此因為在較高溫度熱處理過程中，木材會產生熱降解作用，又低比重木材細胞腔較大，細胞壁較薄，會較高比重木材產生更較大量之裂解，使尺寸變化情形較為明顯。

表2. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材弦向、徑向及縱向之尺寸減低率

Table 2. Shrinkage ratio of tangential, radial, and longitudinal section of *C. japonica* and *A. confusa* woods treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Tangential (%)	Radial (%)	Longitudinal (%)
<i>C. japonica</i>	130	2.89 ± 0.38 ^{al}	0.92 ± 0.46 ^a	0.60 ± 0.18 ^a
	160	3.34 ± 0.61 ^b	1.49 ± 0.67 ^b	0.81 ± 0.31 ^a
	190	4.09 ± 0.39 ^c	1.50 ± 0.40 ^b	0.82 ± 0.26 ^a
	220	7.14 ± 0.95 ^d	2.30 ± 0.93 ^c	1.68 ± 0.09 ^b
	250	8.66 ± 0.93 ^c	3.86 ± 1.21 ^d	2.33 ± 0.92 ^c
	280	16.56 ± 1.70 ^f	6.77 ± 1.37 ^e	3.36 ± 0.50 ^d
<i>A. confusa</i>	130	2.60 ± 0.20 ^a	1.63 ± 0.89 ^a	0.52 ± 0.28 ^a
	160	4.41 ± 0.23 ^b	2.31 ± 0.33 ^{ab}	0.65 ± 0.11 ^b
	190	4.68 ± 0.50 ^b	3.40 ± 0.77 ^{bc}	0.77 ± 0.27 ^c
	220	6.26 ± 0.93 ^c	3.42 ± 0.65 ^{cd}	1.75 ± 0.65 ^d
	250	7.34 ± 0.59 ^d	4.04 ± 0.41 ^d	1.85 ± 0.38 ^d
	280	8.78 ± 0.73 ^e	4.90 ± 0.63 ^d	1.88 ± 0.74 ^d

^l Figures with different superscript letters within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

(三) 顏色變化

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之顏色變化結果如表3所示。未處理及熱處理之柳杉與相思樹材明度 (L^*)、紅綠軸 (a^*) 及黃藍軸 (b^*) 均為正值，其中以130與160°C熱處理柳杉材之 b^* 值有稍微提升，此係低溫處理過程中，較低分子量之酚類結構會呈現灰黃色所致 (Chen *et al.*, 2010; Hiltunen *et al.*, 2006)。但以更高(190°C以上)溫度熱處理後3種顏色參數均有隨溫度升高而降低，此係熱處理過程中木材產生化學變化所致 (Sundqvist and Moreñ, 2002)；在明度差值 (ΔL^*) 方面，柳杉與相思樹材以190°C處理後之 ΔL^* 值明顯降低，顯示兩種木材在此溫度處理後，顏色變暗，此係熱處理過程中木材產生可吸收可見光之化合物所致 (Chen *et al.*, 2010)。Gunduz與Aydemir (2009) 以鵝耳歷木 (*Carpinus betulus* L.) 以170、190

與210°C熱處理後， ΔL^* 會隨處理溫度升高而增加，本試驗結果與其相似。又柳杉與相思樹材經190°C以上熱處理後之 Δa^* 值、 Δb^* 值均為負值，顯示顏色更偏綠及偏藍色，亦即熱處理使柳杉與相思樹材顏色變更深色。由柳杉與相思樹材色差值 (ΔE^*) 結果可知，柳杉與相思樹材以低溫 (130與160°C) 熱處理者，其 ΔE^* 低於10，顏色變化較不明顯，此時主要為抽出物移至表面所致。而以190°C熱處理者，其 ΔE^* 分別為21.36與24.74，木材顏色由此溫度以上處理後開始有明顯變化，此除了為木材抽出物與半纖維素之降解產物 (Sundqvist, 2004; Sehistedt-Persson, 2003)，如糠醛等易著色物質導致木材顏色變深，又在熱處理過程中，木質素中 β -O-4鍵結之斷裂，且甲氧基 (Methoxyl) 含量降低，進而得到更多縮合與氧化產物，如醌類 (Quinones) 等 (Wikberg and Maunu, 2004)；

Bekhta and Niemz, 2003 ; Mitsui *et al.*, 2001) , 此外，處理過程中木質素會形成共軛結構，除了產生醌類結構產物外，也會促進光吸收 (Optical absorption) 與呈色 (Color formation) 之現象 (Chen *et al.*, 2010 ; Windeisen and Wegener, 2008 ; Yamauchi *et al.*, 2005) 。另外，半纖維

素受熱降解會釋出有機酸 (Organic acids) 等物質，進一步會催化多醣類產生降解 (Sivonen *et al.*, 2002 ; Tjeerdsma *et al.*, 1998) 。又在更高溫處理下，木材會有些微炭化情形，因此材面更為深色，且賦予木材厚重感。

(四) 表面粗糙度

表3. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之顏色變化

Table 3. Color changes of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Color factor						
		L*	a*	b*	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*
<i>C. japonica</i>	Control	66.15 ^{fl} (1.15) ²	11.05 ^g (1.53)	19.26 ^e (0.46)	—	—	—	—
	130	65.75 ^f (0.88)	8.39 ^d (0.35)	19.64 ^f (1.67)	-0.40 ^a (0.15)	-2.66 ^b (0.47)	0.38 ^a (0.04)	2.72 ^a (0.50)
	160	60.39 ^e (1.69)	9.46 ^f (0.75)	19.74 ^g (0.56)	-5.76 ^b (0.78)	-1.59 ^a (0.69)	0.48 ^a (0.42)	6.00 ^b (0.83)
	190	44.99 ^d (3.53)	8.78 ^e (0.40)	17.47 ^d (0.83)	-21.16 ^c (0.78)	-2.27 ^b (0.78)	-1.79 ^b (0.36)	21.36 ^c (0.90)
	220	36.37 ^c (0.97)	6.75 ^c (0.53)	11.28 ^c (1.22)	-29.78 ^d (0.17)	-4.30 ^c (0.55)	-7.98 ^c (0.30)	31.13 ^d (0.32)
	250	32.87 ^b (0.52)	4.30 ^b (0.42)	6.65 ^b (0.49)	-33.28 ^c (1.32)	-6.75 ^d (1.63)	-12.61 ^d (0.25)	36.23 ^e (1.38)
	280	25.27 ^a (0.54)	1.85 ^a (0.11)	1.79 ^a (0.21)	-40.88 ^f (7.93)	-9.20 ^e (2.26)	-17.47 ^c (0.46)	45.40 ^f (3.82)
<i>A. confusa</i>	Control	52.41 ^e (2.89)	9.49 ^e (0.59)	19.21 ^f (1.24)	—	—	—	—
	130	51.25 ^c (1.64)	9.45 ^c (0.09)	19.21 ^e (0.79)	-1.16 ^a (0.81)	-0.04 ^a (0.02)	-0.05 ^a (0.05)	2.57 ^a (1.00)
	160	45.36 ^d (2.78)	10.24 ^f (0.04)	17.62 ^d (1.04)	-7.05 ^b (2.21)	0.75 ^b (0.49)	-1.59 ^b (0.09)	4.19 ^b (2.17)
	190	31.03 ^c (0.69)	5.65 ^d (0.39)	7.19 ^c (0.17)	-21.38 ^c (0.33)	-3.84 ^c (0.11)	-12.02 ^c (0.71)	24.74 ^c (0.06)
	220	27.60 ^b (1.13)	2.52 ^c (0.12)	2.33 ^b (0.19)	-24.81 ^d (4.48)	-6.97 ^d (0.01)	-16.88 ^d (1.89)	30.81 ^d (4.59)
	250	27.41 ^b (1.00)	1.62 ^b (0.08)	2.31 ^b (0.15)	-25.00 ^d (2.84)	-7.87 ^e (0.28)	-16.90 ^d (1.85)	32.81 ^e (3.36)
	280	21.41 ^a (1.17)	0.44 ^a (0.13)	0.70 ^a (0.14)	-26.75 ^e (1.29)	-9.05 ^f (0.72)	-18.51 ^e (0.18)	37.22 ^f (0.77)

¹ Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test

² () represent standard deviation.

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之表面粗糙度如表4。柳杉與相思樹木材經不同溫度熱處理後，雖然表面粗糙度值與不同溫度間無一定之規則性，但柳杉材平行木理之Ra、Ry及Rz等表面粗糙度值均較未處理材低，顯示熱處理可以去除木材表面之突起纖維毛，使材面更為平滑；另外，木材於熱處理過程中，木材組成之木質素會產生塑性，而使木材表面更加平滑 (Hakkou *et al.*, 2005)。Gündüz等人 (2008) 將土耳其黑松 (*Pinus nigra* Arn. Subsp. *Pallasiana* var. *pallasiana*) 以120、150與180°C，持溫時間2、6與10 hr處理，試驗結果以不同溫度熱處理後，均會降低木材表面粗糙度。

(五) 吸水率 (WAP)、體積膨脹率 (S) 及抗膨脹效能 (ASE)

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之吸水率 (WAP)、體積膨脹率 (S) 及抗膨脹效能 (ASE) 如表5所示。柳杉與相思樹材經熱處理後，兩種熱處理材之WAP較未處理材者低，但不同溫度間未有一定之規律性；又在相同溫度處理下，柳杉熱處理材之WAP大於相思樹材，此結果係柳杉材密度較相思樹材低，具較大吸水能力所致。在體積膨脹率方面，柳杉與相思樹材隨熱處理溫度之升高而S明顯降低，柳杉材於280°C處理者僅為3.95%，而相思樹處理者僅為8.18%。在抗膨脹效能之結果中，柳杉與相思

表4. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之表面粗糙度

Table 4. Surface roughness of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Surface roughness (μm)		
		Ra	Ry	Rz
<i>C. japonica</i>	Control	9.08 ± 2.02 ^{d1}	67.66 ± 20.82 ^d	36.82 ± 8.08 ^c
	130	4.81 ± 1.39 ^a	27.01 ± 7.29 ^a	16.38 ± 2.17 ^c
	160	6.79 ± 2.37 ^{abc}	39.11 ± 14.02 ^b	21.91 ± 8.00 ^b
	190	7.35 ± 2.57 ^{bcd}	32.33 ± 13.97 ^c	27.98 ± 11.91 ^b
	220	6.67 ± 2.54 ^{abc}	32.16 ± 13.97 ^c	23.89 ± 9.03 ^a
	250	8.19 ± 3.14 ^{cd}	41.15 ± 9.95 ^b	20.40 ± 5.89 ^b
	280	6.93 ± 1.09 ^{ab}	43.29 ± 9.13 ^c	26.56 ± 3.22 ^b
<i>A. confusa</i>	Control	12.36 ± 2.47 ^b	92.51 ± 18.82 ^d	45.15 ± 10.51 ^a
	130	9.80 ± 1.60 ^{ab}	77.78 ± 4.50 ^b	39.63 ± 7.74 ^{cd}
	160	11.30 ± 1.80 ^b	84.60 ± 14.26 ^{bc}	45.57 ± 4.28 ^d
	190	9.13 ± 1.83 ^a	61.69 ± 13.72 ^a	34.34 ± 7.29 ^{ab}
	220	8.32 ± 0.82 ^a	72.58 ± 14.95 ^{ab}	36.57 ± 5.66 ^{bc}
	250	11.62 ± 2.79 ^{ab}	85.59 ± 17.90 ^c	51.55 ± 5.70 ^{cd}
	280	9.76 ± 1.21 ^{ab}	86.74 ± 2.20 ^{abc}	40.01 ± 3.66 ^d

¹ Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

樹材亦隨熱處理溫度升高而增加，柳杉以130與160°C熱處理之ASE無顯著差異，而以190°C以上熱處理者後有顯著差異，其中柳杉材以220°C處理者即增至55.94%以上，280°C熱處理者更高達63.33%，但與250°C處理者未有顯著差異；而相思樹材之ASE經220°C以上熱處理者與較低溫處理者有顯著差異，其中以250°C處理者增至44.57%以上，280°C熱處理者更高達53.53%，由此結果顯示，愈高溫熱處理者有更佳之ASE，此係因木材內碳水化合物於熱處理過程中，產生解聚作用，尤其是半纖維素產生脫水反應 (Dehydration reactions)，而降低木材內自由羥基數量 (Boonstra and Tjeerdsma, 2006)，另外，半纖維素在180°C左右會產生熱

裂解，使木材結構與微纖維 (Microfibrils) 內之儲存應力得以釋出，進而降低內應力 (Kamdern *et al.*, 2002；Kollmann and Fengel, 1965)，因此降低木材吸水膨脹能力，且在熱處理過程中，達到木質素之玻璃轉移點溫度，使木質素產生軟化，可局部消除木材內部之應力，進而達到較佳抗膨脹效能 (Johansson, 2005；Hanhijärvi, 1999)。又在相同溫度處理下，柳杉材得到較佳ASE值，此係柳杉材細胞腔較大，細胞壁較薄，進行吸水試驗時，細胞壁吸水膨脹現象較低。另一方面，也可能因低密度木材於熱處理過程中，受熱較均勻，所產生之熱裂解較高密度木材更為激烈，而降低木材吸濕能力，故有較佳抗膨脹效能。

表5. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之吸水率 (WAP)、體積膨脹率 (S) 及抗膨脹效能 (ASE)

Table 5. Water absorption percent (WAP), volumetric swelling coefficient (S) and antismelling efficiency (ASE) of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Surface roughness (μ m)		
		Ra	Ry	Rz
<i>C. japonica</i>	Control	9.08 ± 2.02 ^{d1}	67.66 ± 20.82 ^d	36.82 ± 8.08 ^c
	130	4.81 ± 1.39 ^a	27.01 ± 7.29 ^a	16.38 ± 2.17 ^c
	160	6.79 ± 2.37 ^{abc}	39.11 ± 14.02 ^b	21.91 ± 8.00 ^b
	190	7.35 ± 2.57 ^{bcd}	32.33 ± 13.97 ^c	27.98 ± 11.91 ^b
	220	6.67 ± 2.54 ^{abc}	32.16 ± 13.97 ^c	23.89 ± 9.03 ^a
	250	8.19 ± 3.14 ^{cd}	41.15 ± 9.95 ^b	20.40 ± 5.89 ^b
	280	6.93 ± 1.09 ^{ab}	43.29 ± 9.13 ^c	26.56 ± 3.22 ^b
<i>A. confusa</i>	Control	12.36 ± 2.47 ^b	92.51 ± 18.82 ^d	45.15 ± 10.51 ^a
	130	9.80 ± 1.60 ^{ab}	77.78 ± 4.50 ^b	39.63 ± 7.74 ^{cd}
	160	11.30 ± 1.80 ^b	84.60 ± 14.26 ^{bc}	45.57 ± 4.28 ^d
	190	9.13 ± 1.83 ^a	61.69 ± 13.72 ^a	34.34 ± 7.29 ^{ab}
	220	8.32 ± 0.82 ^a	72.58 ± 14.95 ^{ab}	36.57 ± 5.66 ^{bc}
	250	11.62 ± 2.79 ^{ab}	85.59 ± 17.90 ^c	51.55 ± 5.70 ^{cd}
	280	9.76 ± 1.21 ^{ab}	86.74 ± 2.20 ^{abc}	40.01 ± 3.66 ^d

¹ Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

(六) 平衡含水率與抗吸濕效能 (MEE)

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材在65與95% RH環境下之平衡含水率與抗吸濕效能 (MEE) 如表6所示。在兩種不同濕度環境下，柳杉與相思樹熱處理材之平衡含水率均隨處理溫度升高而降低，抗吸濕效能則隨處理溫度升高而增加。而MEE方面，以190°C熱處理柳杉者在不同濕度環境下之MEE較130與160°C熱處理者為高，又以220°C熱處理者在65與95% RH下之MEE分別高達51.81及54.04%，以較高溫處理者有較佳抗吸濕效能；而相思樹材以220°C熱處理者在65與95% RH環境下之MEE較130、160與190°C熱處理者為高，仍以高溫處理者更具有較佳之抗吸濕能力。由本實驗得知，不同溫度熱處理對木材抗吸濕效能有顯著

之影響，熱處理可降低木材吸濕性，進而降低平衡含水率及提高抗吸濕效能，因此可提升木材尺寸安定性，此係木材半纖維素之分子量較低，熱解溫度為167~187°C (Elder, 1971)，所以在熱處理過程中會先受熱而產生裂解，而降低木材內羥基；而纖維素熱降解溫度為200~240°C左右，受熱後其結晶區之比例增加 (Bhuiyan and Sobue, 2000)，可抵抗水分子進入木材；另外也因疏水性之木質素在127~193°C產生熱軟化 (Thermal softening)，產生塑性流動，在細胞壁表面形成被覆作用，局部減少細胞壁之親水基，進而降低木材吸濕性 (Hakkou *et al.*, 2005)。另外，在熱處理過程中也會促進木質素衍生物與纖維素反應形成醚鍵鍵結 (Kocae *et al.*, 2009；Boonstra and Tjeerdsma,

表6. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之平衡含水率 (EMC) 與抗吸濕效能 (MEE)

Table 6. Equilibrium moisture content (EMC) and moisture excluding efficiency (MEE) of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	40°C, 65% RH		40°C, 95% RH	
		EMC (%)	MEE (%)	EMC (%)	MEE (%)
<i>C. japonica</i>	Control	8.94 ± 0.27 ^{fl}	—	19.81 ± 0.15 ^f	—
	130	8.57 ± 0.32 ^e	5.00 ± 1.51 ^a	19.16 ± 0.21 ^e	3.62 ± 0.84 ^a
	160	8.08 ± 0.19 ^d	9.05 ± 1.95 ^b	17.51 ± 0.16 ^e	11.63 ± 0.70 ^b
	190	6.64 ± 0.09 ^c	25.75 ± 0.95 ^c	14.38 ± 0.04 ^d	27.76 ± 0.86 ^c
	220	4.39 ± 0.10 ^b	51.81 ± 0.51 ^d	9.11 ± 0.34 ^c	54.04 ± 1.74 ^d
	250	4.06 ± 0.18 ^a	54.05 ± 1.69 ^e	7.05 ± 0.30 ^b	65.24 ± 1.51 ^e
	280	4.03 ± 0.08 ^a	54.33 ± 1.30 ^e	6.65 ± 0.14 ^a	66.43 ± 0.72 ^f
<i>A. confusa</i>	Control	8.75 ± 0.21 ^e	—	20.00 ± 0.66 ^e	—
	130	8.45 ± 0.13 ^e	4.27 ± 1.01 ^a	19.67 ± 0.24 ^d	2.18 ± 0.85 ^a
	160	7.98 ± 0.17 ^d	10.18 ± 2.07 ^b	19.16 ± 0.47 ^d	4.08 ± 1.35 ^b
	190	7.58 ± 0.14 ^c	14.40 ± 1.39 ^b	18.33 ± 0.32 ^c	8.00 ± 1.36 ^c
	220	5.22 ± 0.15 ^b	40.75 ± 0.40 ^c	13.72 ± 0.39 ^b	31.54 ± 1.97 ^d
	250	4.81 ± 0.13 ^a	43.84 ± 1.20 ^c	9.83 ± 0.16 ^a	50.67 ± 0.73 ^e
	280	5.15 ± 0.34 ^b	40.62 ± 3.83 ^c	9.76 ± 0.29 ^a	50.71 ± 1.67 ^e

^l Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

2006), 相對使具親水性之羥基減少。又在相同溫度處理下, 柳杉熱處理者較相思樹者有較佳之抗吸濕效能, 係柳杉密度較低, 細胞壁較相思樹薄, 熱處理過程中受熱均勻, 木材半纖維素產生大量降解, 除增加纖維素結晶區比例外, 也能去除較多羥基, 而增加木材之抗吸濕效能。

(七) 接觸角

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之表面對水接觸角如表7所示。柳杉與相思樹熱處理材之三切面與水之接觸角較未處理材大, 顯示木材經熱處理後, 表面具較佳疏水性, 且隨熱處理溫度升高而增加。其中, 以160°C以上熱處理後, 木材三切面對水之接觸角有顯著增加, 有較佳之疏水性質。此係木材以較高溫度熱處理過程中, 低穩定性醣類會產生降解作用, 相對增加結晶區比率, 提升木材表面疏水性, 另外在熱處理過程中, 木質素於160°C左右產生塑性, 更增加木材表面疏水性質 (Hakkou

et al., 2005)。Nuopponen等人 (2003) 將歐洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 以100、120、140、160、180、200、220與240°C進行熱處理, 以FT-IR分析脂肪與蠟質之變化, 發現在低溫(100~160°C)熱處理過程中, 脂肪與蠟質會沿著薄壁細胞移至木材表面, 影響表面之疏水性, 而以更高溫度(200°C以上)熱處理後, 脂肪與蠟會產生熱裂解, 生成揮發物, 且木質素軟化會使板材內之抽出物更容易擴散至表面。且以高於150°C乾燥處理後, 木材而表面會產生非極性物質 (Non-polar substances), 包含疏水性抽出物與非揮發性有機物質, 而影響木材表面疏水性 (Šernek *et al.*, 2004)。而柳杉與相思樹材以相同溫度熱處理後, 柳杉熱處理者對水接觸角較相思樹處理者大, 此可能係柳杉密度較低, 受熱較均勻, 熱處理過程中木材半纖維素產生熱降解, 增加結晶區比例, 並去除具親水性之羥基, 另外亦可能柳杉含有較多之木質素所致。

表7. 不同處理溫度熱處理柳杉與相思樹材接觸角

Table 7. Contact angle of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Contact angle (°)		
		Cross-section	Tangential-section	Radial-section
<i>C. japonica</i>	Control	69 ± 7 ^{a1}	53 ± 5 ^a	74 ± 3 ^a
	130	70 ± 6 ^a	60 ± 1 ^{ab}	79 ± 1 ^{ab}
	160	85 ± 4 ^b	78 ± 8 ^b	81 ± 1 ^b
	190	81 ± 4 ^b	83 ± 1 ^{bc}	86 ± 3 ^{bc}
	220	82 ± 2 ^b	91 ± 5 ^c	92 ± 4 ^c
	250	98 ± 2 ^c	97 ± 1 ^c	92 ± 1 ^c
	280	113 ± 4 ^d	108 ± 2 ^c	93 ± 2 ^c
<i>A. confusa</i>	Control	36 ± 3 ^a	29 ± 5 ^a	28 ± 4 ^a
	130	36 ± 1 ^a	38 ± 2 ^b	31 ± 2 ^a
	160	42 ± 2 ^b	36 ± 2 ^b	40 ± 3 ^b
	190	45 ± 3 ^b	45 ± 6 ^c	49 ± 2 ^c
	220	67 ± 5 ^c	66 ± 2 ^d	64 ± 1 ^d
	250	103 ± 2 ^d	82 ± 1 ^e	83 ± 3 ^e
	280	111 ± 4 ^e	82 ± 3 ^e	85 ± 2 ^e

¹ Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

(八) 硬度、抗彎強度 (MOR) 與抗彎彈性模數 (MOE)

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之硬度、抗彎強度 (MOR) 與抗彎彈性模數 (MOE) 如表8所示。結果顯示，柳杉材以較低溫 (130、160、190及220°C) 處理後硬度會隨溫度升高而增加，但250°C以上處理者之硬度明顯降低，其中橫切面與弦切面硬度值較未處理者低，又280°C處理者，因木材在高溫下產生大量降解，使橫切面過脆而無法測得硬度值。又相思樹材在較低溫 (130及160°C) 處理後硬度會隨溫度之升高而增加，其中橫切面與弦切面以160°C處理者之表面硬度值為較佳，但190°C以上處理者橫切面與弦切面硬度已開始些微降低，此係以較低溫處理時，木材僅受到乾燥作用，而少產生化學變化，隨含水率降低其硬度值增加，再以更高溫度處理後，木材受熱降解作用使組織結構產生變化，硬度明顯降低 (Kocafe *et al.*, 2009)。相思樹材以較低溫熱處理後之硬度會較柳杉處理者明顯降低，此係因針、闊葉樹木材中半纖維素組成與含量不同所致，針葉樹半纖維素主要是由甘露聚糖與阿拉伯聚糖所組成；而闊葉樹半纖維素則主要由聚木糖及少量甘露聚糖組成，聚木糖中所含乙醯基較甘露聚糖多，所以闊葉樹材中乙醯基 (Acetyl) 較針葉樹材多，而熱處理過程中，更容易產生熱解 (Chaouch *et al.*, 2010; Ramiah, 1970)，所以在較低溫度時，相思樹材表面硬度值會降低較為明顯。

在抗彎強度 (MOR) 之結果與硬度值相似，柳杉材以130及160°C熱處理後，因含水率降低使MOR增加，且較未處理材為高，但190°C以上處理者之MOR則低於未處理者，且隨溫度升高而明顯降低；而相思樹材之熱處理結果與柳杉材相似。

在抗彎彈性模數 (MOE) 方面，柳杉材以190°C以上處理者低於未處理材，其中以160°C處理者最高達6.99 GPa，次之為130與190°C處理者；在熱處理相思樹材MOE之結果中，除以

280°C處理者稍低於未處理材者，其餘溫度處理者則均較未處理材者高，其中又以190°C處理者最高達12.39 GPa，此結果係熱處理過程中，木材半纖維素產生裂解，纖維素結晶之含量相對增加，使木材結構中較堅硬纖維—纖維素鍵結，取代具可撓性之半纖維素—纖維素—半纖維素間之鍵結 (Spiegelberg, 1966) 所致，另外熱處理過程中，會去除木材中半纖維素之乙醯基 (Boonstra and Tjeerdsma, 2006)，使結構排列更為緻密。但更高溫處理時則因纖維素亦開始熱裂解，導致強度下降。

(九) FT-IR分析

不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之FT-IR光譜圖如圖1所示。其中，898 cm^{-1} 代表半纖維素及纖維素C1位置之C-H，1510 cm^{-1} 代表木質素芳香環骨架振動，1740 cm^{-1} 代表羧基、酯基或未共軛醛類等含羰基化合物，3420 cm^{-1} 代表羥基 (Kotilainen *et al.*, 2000)，以變化較為輕微2900 cm^{-1} 處C-H伸縮振動作為標準吸收峰，將上述特定吸收峰與2900 cm^{-1} 之波峰高度比值作為相對強度之比較，並整理如表9所示。柳杉與相思樹熱處理材之試驗結果中，半纖維素及纖維素之吡喃環 (A_{898} / A_{2900})、羰基化合物 (A_{1740} / A_{2900})與羥基 (A_{3420} / A_{2900})之相對強度值較未處理者低，且隨熱處理溫度之升高而降低，由此顯示熱處理除了降低木材中之水分外，半纖維素及纖維素含量亦會隨處理溫度之升高而減少，此係木材於熱處理過程中，半纖維素與部分纖維素產生熱裂解所致；相反地，木質素 (A_{1510} / A_{2900}) 相對強度值會隨處理溫度升高而增加，顯示木質素相對含量會隨之增加，此為木材熱處理過程中，半纖維素與部分纖維素熱裂解，提高木質素相對含量 (Wikberg and Maunu, 2004; Tjeerdsma *et al.*, 1998)，而相思樹亦有相似結果。另外，1060—1030 cm^{-1} 代表纖維素脂肪族醚之C-O-C與醇之C-O-H (Aliphatic ether C-O- and alcohol C-O stretching) 之伸縮振動 (Guo and Bustin, 1998)，在280°C熱處理柳杉與相思樹材之FT-IR光譜圖中 (圖1)，發現此

表8 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之硬度、抗彎強度(MOR)與抗彎彈性模數(MOE)

Table 8 Hardness, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of *C. japonica* A. confusa woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	Hardness (MPa)			MOR (MPa)	MOE (GPa)
		Cross-section	Tangential-section	Radial-section		
<i>C. japonica</i>	Control	26.61 ^{b1} (1.75) ²	19.21 ^b (4.45)	14.73 ^b (3.23)	57.02 ^c (3.93)	6.21 ^c (0.05)
	130	26.91 ^b (0.29)	15.58 ^b ^c (1.08)	19.50 ^c (5.88)	69.70 ^c (3.33)	6.21 ^c (0.50)
	160	29.85 ^c (1.08)	19.43 ^{cd} (2.60)	21.88 ^{cd} (0.88)	72.41 ^d (6.94)	6.99 ^d (0.39)
	190	29.84 ^c (3.02)	20.22 ^d (1.20)	26.85 ^d (11.17)	49.10 ^{cd} (8.79)	6.09 ^{bc} (0.44)
	220	32.50 ^d (2.22)	20.97 ^{bcd} (3.68)	21.71 ^{bcd} (1.54)	24.51 ^b (4.36)	5.40 ^b (0.41)
	250	23.62 ^a (4.41)	13.08 ^{bc} (4.01)	19.42 ^{bc} (2.78)	12.05 ^{ab} (2.76)	4.67 ^b (0.70)
	280	— ³	10.49 ^a (4.16)	12.40 ^a (1.72)	1.84 ^a (0.04)	0.51 ^a (0.08)
<i>A. confusa</i>	Control	70.56 ^c (4.80)	53.63 ^c (2.67)	42.65 ^c (1.83)	108.62 ^c (1.27)	7.09 ^b (0.28)
	130	73.50 ^{dc} (2.04)	53.61 ^c (2.65)	52.33 ^d (4.35)	129.94 ^f (4.05)	7.85 ^d (0.40)
	160	80.36 ^d (3.53)	57.72 ^d (4.30)	51.74 ^d (1.18)	137.69 ^g (6.49)	9.15 ^e (0.06)
	190	67.91 ^c (6.76)	55.01 ^d (5.20)	58.70 ^d (4.61)	65.50 ^d (2.87)	12.39 ^g (0.14)
	220	49.87 ^b (2.96)	51.84 ^b (1.47)	43.35 ^c (5.78)	44.65 ^c (0.53)	10.97 ^f (0.82)
	250	48.41 ^{ab} (2.35)	50.20 ^b (3.54)	35.41 ^b (4.52)	34.22 ^b (3.34)	7.75 ^c (0.13)
	280	43.51 ^a (2.77)	29.32 ^a (3.23)	19.66 ^a (2.10)	10.62 ^a (1.81)	5.65 ^a (0.73)

¹ Figures with different superscripts within a column indicate a significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test

² () represents standard deviation

³ "—" represents the hardness of wood couldn't be measured.

訊號有明顯降低，此係纖維素產生熱裂解，產生C-O鍵結斷裂之變化 (Demirbas, 2000)，使此訊號在圖譜中大量減弱，其中280°C柳杉熱處理材之訊號明顯減弱，顯示以此溫度熱處理後，柳杉材組成大量降解，並有些微炭化情形發生。Kotilainen等人 (2000) 將歐洲赤松

(*Pinus sylvestris*) 及挪威雲杉 (*Picea abies*) 加熱至160~260°C，並持溫2~8 hr之熱處理後，以FT-IR試驗結果，半纖維素與纖維素之β喃環、非共軛羰基及羥基等特定吸收峰明顯降低，而木質素特定吸收峰有些微增加。

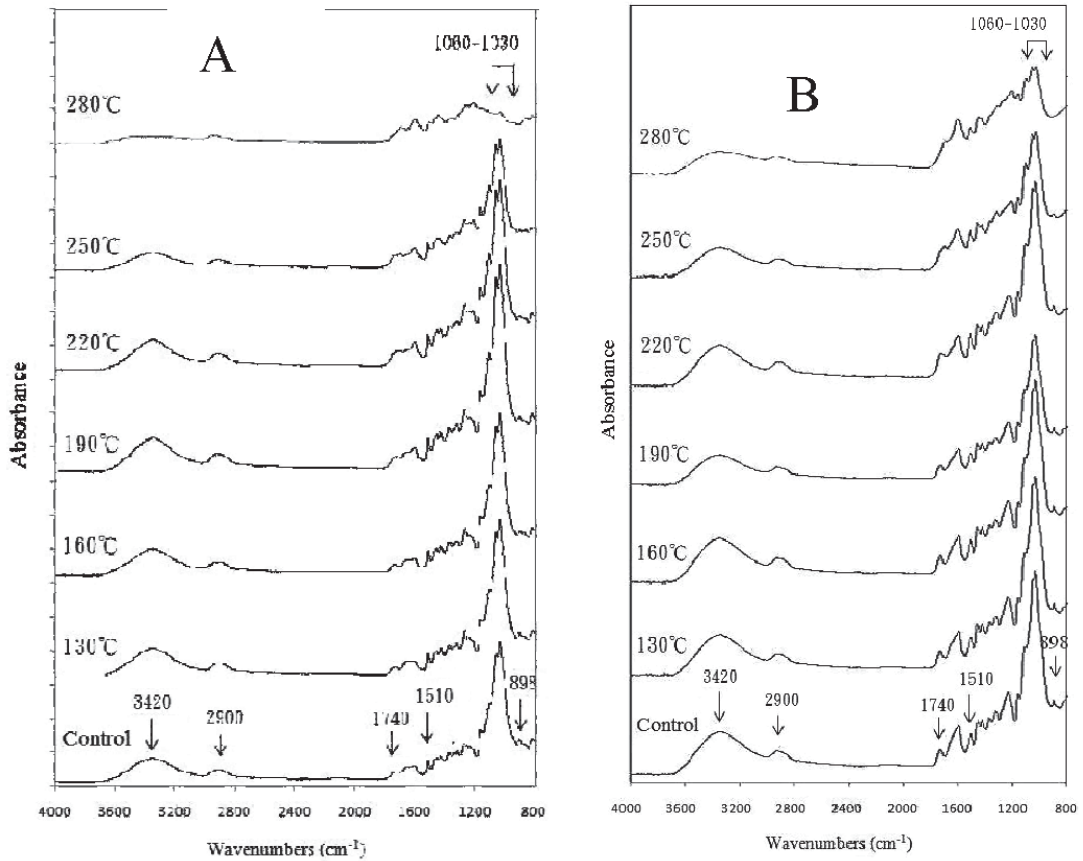


圖1. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之FT-IR光譜圖

Fig. 1. FT-IR spectra of *C. Japonica* (A) and *A. confusa* (B) wood heat treatment with different temperatures.

表9. 不同溫度熱處理柳杉與相思樹材之FT-IR光譜圖中898 cm⁻¹、1510 cm⁻¹、1740 cm⁻¹及3420 cm⁻¹吸收峰之相對強度

Table 9. Relative intensities of peak absorbance at 898 cm⁻¹, 1510 cm⁻¹, 1740 cm⁻¹ and 3420 cm⁻¹ to that at 2900 cm⁻¹ from FT-IR spectra of *C. japonica* and *A. confusa* woods heat treatment with different temperatures

Wood	Treated temperature (°C)	A ₈₉₈ /A ₂₉₀₀	A ₁₅₁₀ /A ₂₉₀₀	A ₁₇₄₀ /A ₂₉₀₀	A ₃₄₂₀ /A ₂₉₀₀
<i>C. japonica</i>	Control	3.895	1.589	1.512	2.030
	130	3.260	1.566	1.296	1.944
	160	3.212	1.639	1.282	1.791
	190	3.114	1.648	1.272	1.780
	220	2.885	1.720	1.256	1.688
	250	2.866	1.805	1.143	1.466
	280	1.911	1.824	1.133	0.846
<i>A. confusa</i>	Control	3.074	1.573	1.271	1.937
	130	2.801	1.542	1.246	1.779
	160	3.024	1.629	1.254	1.708
	190	2.743	1.631	1.223	1.657
	220	2.837	1.848	1.229	1.603
	250	2.256	1.863	1.216	1.402
	280	1.186	1.790	1.121	1.185

四、結論

本研究係將含水率為12%之柳杉 (*C. japonica*) 與相思樹 (*A. confusa*)，以炭化爐並在N₂環境下進行熱處理，探討不同處理溫度(130、160、190、220、250及280°C)對柳杉與相思樹木材各項性質之影響，試驗結論分析如下：

- (一) 柳杉與相思樹木材之質量損失隨熱處理溫度升高而增加，最高溫280°C熱處理後，質量損失分別達到49.58與35.69%；含水率隨熱處理溫度上升而降低；又熱處理材密度降低率隨處理溫度之升高而增加。柳杉與相思樹材經熱處理後，以弦向收縮最為明顯，且會隨溫度升高而增加，而徑向減低率次之，縱向者為最低。
- (二) 190°C以上熱處理柳杉與相思樹材表面顏色變較暗和深色；又木材熱處理可降低粗

糙度，使材面更加平滑；且熱處理可有效降低木材吸濕性，提高抗膨脹效能及抗吸濕效能，且降低平衡含水率，進而提高木材尺寸安定性。柳杉與相思樹材經熱處理後，木材表面具較佳疏水性，且會隨熱處理溫度升高而增加。

- (三) 柳杉材硬度以較低溫(130、160及190°C)處理有隨溫度升高而上升之趨勢，而相思樹材在較低溫(130及160°C)處理後硬度亦會隨溫度之升高而增加。又190°C以上熱處理柳杉與相思樹者之MOR會隨溫度升高而強度明顯降低。柳杉木材以190°C以下處理者之MOE高於未處理材；而相思樹木材以190°C處理者為最高。
- (四) 經FT-IR分析，代表半纖維素及纖維素 A₈₉₈ /A₂₉₀₀、A₁₇₄₀ /A₂₉₀₀ 與A₃₄₂₀ /A₂₉₀₀ 之相對強度值均較未處理材者為低，且有隨熱

處理溫度升高而降低之趨勢，而代表木質素之A 1510 /A 2900之相對強度隨熱處理溫度升高而增加，說明柳杉與相思樹材在熱處理過程中，半纖維素、纖維素及木質素均有產生化學變化。

五、引用文獻

- 王松永 (1983) 商用木材。林產事業協會。pp.115。
- 林仁政 (1997) 熱處理改良木材安定性之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。台中。pp.22-79。
- 周永東、姜笑梅、劉君良 (2006) 木材超高溫熱處理技術的研究及應用進展。木材林業 20(5) : 1-3。
- 中華民國行政院農業委員會林務局 (2005) 統計資料—臺灣地區造林面積。http://www.forest.gov.tw/mp.asp?mp=1。
- 劉正字、盧崑宗 (2002) 木材塗裝工程。藝軒圖書出版社。p.11。
- Akyildiz, M. H. and S. Ates (2008) Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey. Res. J. Agric. & Biol. Sci. 4(6): 660-665.
- Bekhta, B. P. and P. Niemz (2003) Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. Holzforschung 57, 539-546.
- Bhuiyan, M. T. R. and N. H. N. Sobue (2000) Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. J. Wood Sci. 46: 431-436.
- Boonstra, M. J. and B. Tjeerdsma (2006) Chemical analysis of heat treated softwoods. Holz Roh Werkst. 64: 204-211.
- Chang, H. T. and S. T. Chang (2006) Modification of wood with isopropyl glycidyl ether and its effects on decay resistance and light stability. Bioresour. Technol. 97:1265-1271.
- Chaouch, M., M. Pétrissans, A. Petrisans and P. Gerardin (2010) Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. Polym. Degrad. Stab. 95: 2255-2259.
- Chen, Y., Y. Fan, J. Gao and H. Li (2010) Coloring characteristics of in situ lignin during heat treatment. Wood Sci. Technol. DOI 10.1007/s00226-010-0388-5.
- Del Menezzi, C. H. S., R. Q. de Souza, R. M. Thompson, D. E. Teixeira, E. Y. A. Okino and A. F. da Costa (2008) Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. Int. Biodeterior. Biodegrad. 62: 448-454
- Demirbas, A. (2000) Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of Biomass. Energy Conver. Manage. 41: 633-646.
- Gobakken, L. R. and M. Westin (2008) Surface mould growth on five modified wood substrates coated with three different coating systems when exposed outdoors. Int. Biodeterior. Biodegrad. 62 : 397-402.
- Gündüz, G., S. Korkut and D. S. Korkut (2008) The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra Arn. Subsp. Pallasiana var. pallasiana*) wood. Bioresour. Technol. 99: 2275-2280.
- Gunduz, G. and D. Aydemir (2009) Some physical properties of heated Hornbeam (*Carpinus betulus L.*) wood. Drying Technol. 27:714-720.
- Guo, Y. and R. M. Bustin (1998) FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals.

- Int. J. Coal Geol. 37: 29-53.
- Hakkou, M., M. Petrissans, A. Zoulalian and P. Gerardin (2005) Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polym. Degrad. Stab.* 89: 1-5.
- Hakkou, M., M. Petrissans, P. Gerardin and A. Zoulalian (2006) Investigation of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polym. Degrad. Stab.* 91: 393-397.
- Hanhijärvi, A. (1999) Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part II. Experimental results under constant conditions (viscoelastic creep). *Holz Roh Werkst.* 57(5): 365.
- Hiltunen, E., T. T. Pakkanen and L. Alvila (2006) Phenolic compounds in silver birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Holzforschung* 60: 519-527.
- Johansson, D. (2005) Strength and colour response of solid wood to heat treatment. Division of Wood Technology. Lulea University of Technology. Department of Skellefteå Campus, pp.13-17.
- Kamdem, D. P., A. Pizzi and A. Jermannaud (2002) Durability of heat-treated wood. *Holz Roh Werkst.* 60: 1-6.
- Kocaepe, D., S. Poncsak, J. Tang and M. Bouazara (2009) Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. *J Mater Sci* 45:681-687.
- Kotilainen, R. A., T. J. Toivanen and R. J. Alén (2000) FTIR monitoring of chemical changes in softwood during heating. *J. Wood Chem. Technol.* 20 (3): 307-320.
- Kollmann, F. and D. Fengel. (1965) Changes in the chemical composition of wood by thermal treatment. *Holz Roh Werkst.* 23(12): 461-468.
- Lu, K. T. and S. L. Lin (2008) Synthesis of polyurethane resins and its improvement on dimensional stability and finishing performances of medium- and small-diameter softwoods. *J. Appl. Polym. Sci.* 108: 2029-2036.
- Manninen, A. M., P. Pasanen and J. K. Holopainen (2002) Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood. *Atmos. Environ.* 36: 1763-1768.
- Metsä-Kortelainen, S., T. Antikainen and P. Viitaniemi (2006) The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. *Holz als Roh-und Werkstoff* 64: 192-197.
- Mitsui, K., H. Takada, M. Sugiyama and R. Hasegawa (2001) Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: part 1 Effect of treatment conditions on the change in colour. *Holzforschung* 55: 601-605.
- Nuopponen, M., T. Vuorinen, S. Jämsä and P. Viitaniemi (2003) The effects of a heat treatment on the behavior of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. *Wood Sci. Technol.* 37: 109-115.
- Ramiah, M. V. (1970) Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *J. Appl. Polym. Sci.* 14: 1323-1337.
- Ramsden, M. J., F. S. R. Blake and N. J. Fey (1997) The effect of acetylation on the mechanical properties, hydrophobicity and dimensional stability of *Pinus sylvestris*. *Wood Sci. Technol.* 31, 97-104.
- Sehistedt-Persson, M. (2003) Colour responses to

- heat treatment of extractives and sap from pine and spruce. In: 8th International IUFRO Wood Drying Conference. Brasov, Romania, 459-464.
- Šernek, M., F. A. Kamke and W. G. Glasser (2004) Comparative analysis of inactivated wood surface. *Holzforschung* 58: 22-31.
- Shi, J. L., D. Kocaefe, T. Amburgey and J. Zhang (2007) A comparative study on brown-rot fungus decay and subterranean termite resistance of thermally-modified and ACQ-C-treated wood. *Holz Roh Werkst* (2007) 65: 353-358. Appleton, Wisconsin.
- Sivonen, H., S. Maunu, F. Sundholm, S. Jämsä and P. Viitaniemi (2002) Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 56: 648-654.
- Spiegelberg, H. L. (1966) The effect of hemicelluloses on the mechanical properties of individual pulp fibers. Thesis, The Institute for Paper Chemistry, Lawrence University.
- Sundqvist, B. (2004) Colour changes and acid formation in wood during heating. Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, p.10.
- Sundqvist, B. and T. Moreñ (2002) The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *Holz Roh Werkst.* 60: 375-376.
- Tjeerdsma, B., M. Boonstra, A. Pizzi, P. Tekely and H. Militz (1998) Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Roh Werkst.* 56: 149-15.
- Vick, C. B. (1999) Adhesive bonding of wood materials. In: *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. USDA Forest Products Laboratory, Madison, WI, pp. 9-1~9-23.
- Windeisen, E. and G. Wegener (2008) Behaviour of lignin during thermal treatments of wood. *Ind. Crops Prod.* 27: 57-62.
- Wikberg, H. and S. Maunu (2004) Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydr. Polym.* 58: 461-466.
- Yamauchi, S., Y. Iijima and S. Doi (2005) Spectrochemical characterization by FT-Raman spectroscopy of wood heat-treated at low temperatures: Japanese larch and beech. *J. Wood Sci.* 51: 498-506.