

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 99-00-5-06

熱處理木材之製造與運用

Manufacture and Application of Heat-treated Wood



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立中興大學 森林學系

中華民國 99 年 12 月

行政院農業委員會林務局 99 年委託研究計畫

計畫名稱：熱處理木材之製造與運用

Manufacture and Application of Heat-treated Wood

計畫編號：**99-00-5-06**

計畫主持人：盧崑宗 教授

協同研究人員：郭瑋玲 研究生

執行機關：國立中興大學 森林學系

【摘要】本研究係以無使用化學藥劑之熱處理技術，擬改善木材尺寸安定性。試驗係利用炭化爐，通入 N_2 ，在升溫速率 $20^\circ C/hr$ 下，分二部分進行，第一部分為材料為 20-30 年生，厚度 5 cm 之相思樹 (*Acacia confusa*) 及柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 木材，探討不同熱處理溫度 (130 、 160 、 190 、 220 、 250 及 $280^\circ C$)，並持溫 2 hr 之熱處理對柳杉木材性質之影響；第二部分為材料為 20-30 年生之相思樹 (*Acacia confusa*) 木材加熱至 $190^\circ C$ ，並持溫 3 hr 進行熱處理，分析不同厚度 (3、5 及 7 cm) 對相思樹木材性質之影響。分析項目包括質量損失、含水率、密度、色差值、粗糙度、尺寸安定性、表面硬度、靜曲強度、熱重量分析 (TGA) 及傅立葉紅外線光譜 (FT-IR) 分析。不同溫度熱處理相思樹及柳杉木材試驗結果顯示，木材質量損失及色差值 (ΔE^*) 隨熱處理溫度提高而增加，而密度與含水率則明顯降低；表面粗糙度經熱處理後則較為平滑；抗收縮效能 (ASE) 與抗吸濕效能 (MEE) 隨熱處理溫度提高而有明顯之改善效果。熱處理材之表面硬度方面，相思樹以較低溫 ($190^\circ C$ 以下) 處理之硬度值較未處理材有增加的現象，而以 $190^\circ C$ 以上熱處理者之硬度則明顯降低，而柳杉以 $220^\circ C$ 處理之硬度值高於未處理材者，而以 $250^\circ C$ 以上熱處理者之硬度則明顯降低。不論相思樹或柳杉熱處理材之靜曲破壞係數 (MOR) 在 $190^\circ C$ 以上處理者，隨溫度增加而降低，但靜曲彈性係數 (MOE) 相思樹以 $190^\circ C$ 處理者為最高，而柳杉則以 $160^\circ C$ 處理者為最高。在熱重損失分析 (TGA) 結果顯示，相思樹熱之未處理及較低溫 ($190^\circ C$ 以下) 熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 $300^\circ C$ 及 $350^\circ C$ 左右，而 $220^\circ C$ 以上熱處理者僅在 $350^\circ C$ 有一階段熱裂解，而柳杉未處理及 $250^\circ C$ 以下熱處理材均產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 $350^\circ C$ 及 $500^\circ C$ 左右，而 $280^\circ C$ 熱處理者僅在 $500^\circ C$ 有一階段熱裂解。而在 FT-IR 分析中，不論相思樹或柳杉熱處理材代表半纖維素及纖維素之 pyranoid ring (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} 相對強度隨熱處理溫度升高而增加。另外，在不同厚度相思樹木材熱處理試驗結果中，木材之 ASE 與 MEE 隨厚度減少而增加，並以厚度 3cm 熱處理者具有最佳尺寸安定性，且顏色最深；而硬度、MOR 及 MOE

則隨厚度之減少而降低；TGA 分析中，第一階段裂解溫度隨厚度減少而增加；FTIR 分析結果中，代表半纖維素及纖維素之相對強度隨熱處理木材厚度減少而降低，而代表木質之相對強度則隨厚度減少而增加。綜合以上結果，柳杉及相思樹在厚度 5 cm 及 190 °C 熱處理下，在熱處理材之尺寸安定性及機械強度可得最佳平衡。

【關鍵字】相思樹木材、柳杉木材、熱處理、尺寸安定性、機械強度

【Abstract】 In this study, a non-chemical agent heat-treated technology was applied for improving the dimensional stability of wood. The heat treatment was conducted using an activated furnace under N₂ atmosphere and at a heating rate of 20°C/hr. Two sections were performed, the first one was using a 20-30 years old *Acacia confusa* and *Cryptomeria japonica* wood with thickness of 5 cm and moisture content of 12% to examine the effect of different temperatures of 130, 160, 190, 220, 250, and 280°C on the characteristics of heat-treated wood at a holding time of 2 hr. The second section was to investigate the effect of different thickness of 3, 5, and 7 cm on the properties of heat-treated *A. confusa* wood at the temperature of 190°C and holding time of 2 hr. The characteristics of heat-treated wood such as mass loss, moisture content, density, color change, roughness, dimensional stability, surface hardness, static bending strength as well as thermogravimetric analysis (TGA) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis were examined. The results of different temperatures treated both of *A. confuse* and *C. japonica* wood 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 *A. confusa* at lower temperature (below 190°C) heat-treated wood was higher than that of un-treated wood, while the hardness decreased significantly for the one over 190°C treatment. While for *C. Japonica* below 220°C heat-treated wood was higher than that of un-treated wood, while the hardness decreased significantly for the one of 250°C treatment. The modulus of rupture (MOR) of both *A. confusa* and *C. japonica* treated-wood with over 190°C treatment decreased with increasing heated temperatures. However, the one treated at 160°C had the highest modulus of elasticity (MOE). In terms of TGA, the untreated and lower temperature (below 190°C) heat-treated *A. confusa* wood had two steps thermal degradation, i.e. 300 and 350°C, respectively, but the ones treated over 220°C had only one step thermal degradation at 350°C. In addition, the untreated and below temperature of 250°C heat-treated *C. Japonica* wood had two steps thermal degradation, i.e. 350 and 500°C, respectively, but the ones treated at 280°C had only one step thermal degradation at 500°C. According to FT-IR, both of *A. confusa* and *C. Japonica*, the relative intensities of pyranoid ring (A_{898} / A_{2900}), carbonyl (A_{1700} / A_{2900}) and -OH (A_{3420} / A_{2900}), represented hemicellulose and cellulose of treated wood were lower than those of untreated wood, and decreased with increasing heated temperatures. However the relative intensities of A_{1510} / A_{2900} represented lignin increased with increasing heated temperatures. In addition, the results of different thickness for treated *A. confusa* wood indicated that the ASE and MEE increased with decreasing wood thickness, and the 3 cm one had the best dimensional stability and darkest color. While, the surface hardness, MOR, and MOE decreased with decreasing wood thickness. The TGA analysis showed that the temperature of the first steps thermal degradation increased with decreasing wood thickness. According to FT-IR, the relative intensities of hemicellulose and cellulose of treated wood were decreased with decreasing wood thickness. However the relative intensities of lignin increased with decreasing wood

thickness. It could be concluded that the heated temperature of 190°C and thickness of 5 cm for *C. japonica* and *A. confusa* wood had the best balance between dimensional stability and mechanical strength of heat-treated wood.

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

一、前言

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的結構材料、家具及其他手工業裝飾品，然而木材的組織複雜，具多孔性、異方性、吸濕性、容易收縮膨脹割裂，易腐朽變色，暴露在陽光風雨下易劣化，這些變質因素均會顯著降低木製品的品質。因此，增加木材尺寸安定性及防腐效能，將是拓展木材用途的必要手段；以往對於木材之改質，常以化學處理法(如酯化、醚化等)改善木材之尺寸安定性，以 CCA 或 ACQ 等防腐劑增加木材之防腐性能，這些處理方法雖能達到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；而熱處理係以不銹鋼製機械爐，在 150-230°C 之高溫下，並適度通入水蒸氣，使木材組成分產生化學變化而達到改質之目的，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(Gundz 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，且已有商品問世。由於各種木材之組織構造及物化性質互異，必須以最佳熱處理變因(例如最終加熱溫度、升溫速率、持溫時間、調節處理等)才能獲得優良效能之熱處理材，再者，為提高木材的自給率，國內人工造林之中小徑木的推廣利用實刻不容緩，若能經由無毒環保之熱處理技術以改善其尺寸安定性，增加防腐性能，將可大大拓展中小徑木之用途。本研究係以國內蓄積量頗豐的闊葉樹材相思樹 (*Acacia confusa*) 及針葉樹材柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 為材料，試驗分二部分進行，第一部分為材料為 20-30 年生，厚度 5 cm 之相思樹及柳杉木材，探討不同熱處理溫度(130、160、190、220、250 及 280°C)，並持溫 2 hr 之熱處理對柳杉木材性質之影響；第二部分為材料為 20-30 年生之相思樹木材加熱至 190°C，並持溫 3 hr 進行熱處理，分析不同厚度(3、5 及 7 cm) 對相思樹木材性質之影響。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

本試驗採自中興大學惠蓀林場之 20-30 年生相思樹(*Acacia confusa*)木材。試材經氣乾後，裁切成 5×5×33、5×5×15、3×3×15、3×3×1、3×3×0.5 cm³ 等尺寸，再於恆溫恆濕機(20°C、65% RH)中調濕一週後備用。

(二) 試驗方法

1. 木材組成分分析

將相思樹木材以磨粉機研磨成木粉，利用振動篩篩選粒徑介於 40~60 mesh (425~250 μm)者，進行以下組成分分析。

(1)乙醇-甲苯萃取物含量：依中華民國國家標準 CNS 4713 乙醇-甲苯抽出物試驗法測定之。

(2)全纖維素含量：依中華民國國家標準 CNS 3085 木材全纖維素試驗法測定之。

(3) α -纖維素含量：依中華民國國家標準 CNS 10865 木材 α -纖維素試驗法測定之。

(4)酸不溶木質素含量：依中華民國國家標準 CNS2721 木材及紙漿中酸不溶性木質素試驗法測定之。

2. 木材熱處理

將含水率 12%之相思樹木材，置於內部體積為 25×25×25 cm³之活化爐(奇豪電熱)中。以 500 mL/min 通入 N₂，經 30 min 後將 N₂ 通入速率調至 50 mL/min。在升溫速率 20°C/hr 下，由室溫升至 100°C，持溫 6 hr，再以相同升溫速率分別升溫至 130、160、190、220、250 及 280°C，並持溫 2 hr 且持續通入 N₂，試驗終了冷卻至室溫，即為熱處理材，再分別進行以下性質分析。

(1)質量損失：未處理材之重量(W₀)，以不同溫度進行熱處理後，待溫度降至室溫後之處理材質量(W₁)，以下式計算質量損失(WPG)。

$$WPG(\%)=(W_0-W_1)\times 100/W_0$$

(2)含水率：依中華民國標準 CNS452 木材含水率試驗法試驗之。將試材製成一邊 20 mm 橫斷面，纖維方向長 25±5 mm 之長立方體，進行稱重(m_1)並紀錄。再將試材置於溫度 103±2°C 乾燥至恆重，紀錄質量(m_2)，計算含水率值(W%)。

$$W(\%)=(m_1-m_2)\times 100/m_2$$

m_1 :試體乾燥前質量(g)； m_2 ：試體乾燥後質量(g)

(3)密度：依中華民國國家標準 CNS451 木材密度試驗法試驗之。將試材製成一邊 20 mm 橫斷面，纖維方向長 25±5 mm 之正角柱狀。將試驗在未處理前先量測其質量(g)及體積(cm^3)，計算處理前之密度(至小數點第二位)，於熱處理後再量測質量及體積，計算熱處理前後的密度變化，評估密度降低百分比($r\%$)。

$$d = m / v$$

d：密度；m：試材質量(g)；v：試材體積(cm^3)

$$r(\%) = (d_0 - d_1) \times 100 / d_0$$

d_0 ：熱處理前密度； d_1 ：熱處理後密度

(4)尺寸收縮率：測量試材 3.0 cm(R)×3.0 cm(L)×0.5 cm(T)置於溫度 103±°C 烘箱內乾燥至恆重。將試材移至調濕環境(65±5% RH，溫度 20°C±2°C)，調濕至平衡含水率，分別量測弦、徑及縱向長度。經不同溫度熱處理過後，再量測弦、徑及縱向長度，以下式計算出尺寸收縮率(α)。

$$\alpha(\%)=(r_1-r_0)\times 100/r_0$$

r_0 ：未處理試材長度， r_1 ：熱處理試材的長度

(5)色差值：將熱處理前後之試材，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。測試時，將試材直接置於測試窗上以測取 X、Y、Z 三刺激值 (Trisitimus values)，然後依 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，試材表面顏色變化程度以明度差值 (Brightness difference, ΔL^*)、紅綠軸差值 (Δa^*)、黃藍軸差值 (Δb^*) 及色差值 (Color difference, ΔE^*) 表示。每試材測定 5 點，再平均之。

(6)表面粗糙度：粗糙度之表示法，可分別以測定 a. 中心線平均粗糙度 (Center line average roughness, Ra)：係在基準測定長度內之中心線至凸點與凹點之平均間隔，b. 十點平均粗糙度 (Ten point height roughness, Rz)：係在基準測定長度內，抽取最高至第五高的山頂標高平均值與最深到第五深的谷底標高平均值之差，c. 最大粗糙度 (Maximum roughness, Rmax)：係抽取基準測定長度部分，以平行平均線的 2 直線上下夾之，最高峰值及最低谷值的差值，通常粗糙度以 Ra 最具代表性。本試驗以針觸式表面粗糙度儀 (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) 8 mm。

(7)接觸角：熱處理前後的木材，使用蒸餾水做為滴液，以表面接觸角測定儀 (Kyowa) 測定 15 sec 時之接觸角，每試片測定 6 點再平均之。

(8)尺寸安定性

a. 浸水試驗：測量試材 3.0 cm(R)×3.0 cm(L)×1.0(T)在絕乾狀況下的體積與重量後，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 天，置換新的蒸餾水，重複上述步驟置第 7 天結束試驗，量測試材在濕潤狀況下的體積與重量。試材經過浸水試驗後依下列公式計算試材的體積膨脹率 (Volumetric swelling coefficient, S)、抗膨脹效能 (Antiswelling efficiency, ASE) 與吸水率 (Water absorption percent, WAP)

$$S(\%) = (V_w - V_0) \times 100 / V_0$$

V_w ：試材於飽水狀態下體積， V_0 ：試材絕乾體積

$$ASE(\%) = (S_c - S_t) \times 100 / S_c$$

S_c ：未處理材經浸水試驗後的體積膨脹率， S_t ：處理材經浸水試驗後的體積膨脹率

$$WAP(\%) = (W_w - W_0) \times 100 / W_0$$

W_w ：試材於飽水狀態的重量， W_0 ：試材的絕乾重量

b. 吸濕性試驗：將試材 3.0 cm(R)×3.0 cm(L)×1.0(T)置於 103°C±2°C 的烘箱內

烘乾，秤取試材質量至恆重後，將試材移入溫度 40°C，65% RH 的恆溫恆濕箱中調濕，於放置時間 72 hr 時，秤取試材質量，計算在 65 % RH 環境下的平衡含水率(Equivalent moisture content, EMC)，以及木材經熱處理後之抗吸濕效能(Moisture excluding efficiency, MEE)。再將試材移置溫度 40°C 與 95% RH 的恆溫恆濕箱中調濕，同樣為 72 hr 時，秤取試材質量，計算試材於 95 % RH 環境下的 EMC(%)及木材經熱處理後的抗吸濕效能 MEE(%)，進行 6 重複試驗。

$$EMC(\%)=(W_E - W_0) \times 100 / W_0$$

W_E ：試材於該相對濕度下平衡時的質量， W_0 ：試材的絕乾質量

$$MEE(\%)=(E_c - E_t) \times 100 / E_c$$

E_c ：未處理材之平衡含水率， E_t ：熱處理材之平衡含水率

(9)機械性質

a.硬度：依中華民國 CNS460 木材硬度試驗法試驗之。試材尺寸為 4.0 cm (L)×4.0 cm(R)×2.0 cm(T)。以 Brinell 硬度法測定其抗凹硬度，選用直徑 10±0.1 mm 之鋼球，以萬能強度試驗機(Universal testing machine)分別測定橫向、弦向及徑向，各試驗面進行 10 重複試驗。平均載重速度為 0.5 mm/min，壓入深度 1/π (約 0.32mm)，以下式計算之。

$$H=P/10$$

H：硬度(Kgf/mm²)，P：鋼球壓入 1/π 時之最大載重(kgf)

b.靜曲強度(Static bending strength):依中華民國 CNS454 木材抗彎試驗之。試材尺寸為 32.0 cm (L)×2.0 cm (R)×2.0 cm (T)，跨距為 28 cm，採中央集中載重法，載重面為徑向，平均載重速度為 3 mm/min，以下式計算其靜曲破壞係數(Modulus of rupture, MOR)及靜曲彈性係數(Modulus of elasticity, MOE)。

$$MOR=(3P_{\max}L)/(2wh^2)$$

$$MOE=(\Delta PL^3)/(4\Delta Ywh^3)$$

P_{\max} ：最大載重(kgf) (kgf/cm²)

L：跨距(cm)

ΔP ：比例限界內上限載重與下限載重差 (kgf)

ΔY ： ΔP 相對之跨距中央之彎曲變形量 (cm)

w：試材垂直壓力之寬度或樑之寬 (cm)

h：試材垂直壓力之寬度或樑之厚 (cm)

(10)元素分析: 使用 Elementer vario ELⅢCHN-OS Rapid F002 元素分析儀 (Elemental analyzer, EA)，進行碳(C)、氫(H)、氧(O)及氮(N)含量分析。

(11)熱重量分析(Thermogravimetric analysis,TGA)：將熱處理材以研磨機磨成粉末狀，以 Perkin-Elmer Pyris 1 熱重分析儀進行分析。取木粉約 2-3 mg 於白金樣品盤中，使其充分接觸底部並分散均勻，並精秤之，測試環境氣體為氮氣，升溫速率為 10°C/min，加熱範圍為 50-800°C，紀錄熱重損失曲線(TG)及導數熱重曲線(DTG)，並分析各熱降解階段之起始溫度及熱重損失率。

(12)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 紅外線光譜儀，以木粉進行全反射檢測模式分析，測定光譜範圍為 650-4000 cm^{-1} ，掃描次數為 32 次。

三、結果與討論

(一)不同溫度熱處理相思樹木材之特性

表 1 為相思樹木材之化學組成；其中，乙醇-甲苯抽出物有 6.57%， α -纖維素佔 40.42%，木質素佔 24.17%。相思樹木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 2 所示。木材質量損失隨熱處理溫度之升高而增加，其原因除了木材中之水分散失外，愈高溫處理則木材中之抽出成分及組成分，尤其半纖維素產生熱裂解所致，其中，以最低溫之 130°C 處理之質量損失為 7.55%，主要為木材中吸著水之散失，而最高溫之 280°C 熱處理後，質量損失達到 43.23%，此應是吸著水散失，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。又相思樹木材經熱處理後之含水率隨溫度上升而降低，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，第一層水分子仍不會脫離，此層含水率約 1.0~4.8%左右(劉正宇、盧崑宗，2002)。木材熱處理後，又因水分散失及組成分之熱劣解或揮發，木材密度也隨之降低，由表 2 中顯示，每塊相思樹木材之密度均有些許差異，隨熱處理溫度升高其密度降低率隨之增加，尤其 200°C 以上熱處理者，密度降低率達 10% 以上，此結果顯示，木材經熱處理後重量變輕。

表 1 相思樹木材之化學組成

Table 1 Chemical composition of *A. confusa* wood

試材	乙醇-甲苯抽出物 (%)	全纖維素 (%)	α -纖維素 (%)	木質素 (%)
相思樹	6.57 (1.22)	65.57 (0.57)	40.42 (0.59)	24.17 (3.20)

()內為標準偏差值

表 2 不同溫度熱處理相思樹木材質量損失、含水率及密度

Table 2 Mass loss, moisture content and density of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理 溫度 (°C)	質量 損失 (%)	含水率 (%)	密 度		
			熱處理前 (g/cm ³)	熱處理後 (g/cm ³)	降低率 (%)
130	7.55	3.08 (0.27)	0.773(0.063)	0.768(0.060)	0.65
160	9.70	2.62 (0.21)	0.869(0.037)	0.853(0.013)	1.84
190	11.79	1.39 (0.20)	0.855(0.017)	0.810(0.037)	5.26
220	17.15	0.69 (0.10)	0.886(0.079)	0.790(0.075)	10.83
250	27.22	0.36 (0.14)	0.857(0.036)	0.742(0.033)	13.41
280	43.23	0.32 (0.02)	0.888(0.032)	0.729(0.029)	17.91

()內為標準偏差值

木材熱處理過程中水分會散失，而使木材尺寸產生收縮變化，由於組織構造上的差異，木材收縮具異方性，三個切面有不同之尺寸收縮率。由表 3 可發現，相思樹木材經熱處理過後，弦向之收縮最為明顯，且隨溫度升高而增加，以 280°C 處理者之最高收縮率可達 8.78%，徑向收縮率次之，而縱向者為最低。又弦向/

徑向之比值以愈高溫(220°C 以上)處理者愈趨於一致，比值約為 1.8。

表 3 不同溫度熱處理相思樹木材弦向、徑向及縱向之尺寸收縮率(%)

Table 3 Shrinkage ratio of tangential, radial, and longitudinal section of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	弦向 (%)	徑向 (%)	縱向 (%)	弦向/徑向
130	2.60 (0.20)	1.63 (0.89)	0.52 (0.28)	1.60
160	4.41 (0.23)	2.31 (0.33)	0.65 (0.11)	1.91
190	4.68 (0.50)	3.40 (0.77)	0.77 (0.27)	1.38
220	6.26 (0.93)	3.42 (0.65)	1.75 (0.65)	1.83
250	7.34 (0.59)	4.04 (0.41)	1.85 (0.38)	1.82
280	8.78 (0.73)	4.90 (0.63)	1.88 (0.74)	1.79

()內為標準偏差值

不同溫度熱處理相思樹木材顏色變化如表4所示；未處理及熱處理相思樹木材之明度(L*)、紅綠軸(a*)及黃藍軸(b*)均為正值，但熱處理後3種顏色參數均有隨溫度升高而下降的趨勢，在明度差值方面，至以190°C處理者 ΔL^* 值降低明顯，顯示木材在此溫度處理後明度下降，同時 Δa^* 值、 Δb^* 值亦均為負值，顯示以190°C處理後木材顏色更偏綠及偏藍色，亦即木材顏色變更暗及更深色，而色差值(ΔE^*)亦有相同現象，由此可知，相思樹木材在190°C熱處理後，其組成分之半纖維素或部分木質素已開始熱裂解，同時產生糠醛(furfural)等著色物質，導致木材顏色變深，但此深色更賦予木材厚重感。

表 4 不同溫度熱處理相思樹木材之顏色變化

Table 4 Color changes of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	顏 色						
	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
未處理	52.41	9.49	19.21	—	—	—	—
130	51.25	9.45	19.21	-1.16	-0.04	-0.00	2.57
160	45.36	10.24	17.62	-7.05	0.75	-1.59	4.19
190	31.03	5.65	7.19	-21.38	-3.84	-12.02	24.74
220	27.60	2.52	2.33	-24.81	-6.97	-16.88	24.32
250	27.41	1.62	2.31	-25.00	-7.87	-16.90	37.56
280	25.66	0.44	0.70	-26.75	-9.05	-18.51	34.85

表 5 為不同溫度熱處理相思樹木材之表面粗糙度；未處理相思樹木材之中心線平均粗糙度(Ra)、十點平均粗糙度(Rz)及最大粗糙度(Rmax)分別為 12.36、45.15 及 92.51 μm ，經不同溫度熱處理後，雖然表面粗糙度值與不同處理溫度間並無一定之規則性，但相思樹木材平行木理之 Ra、Rz 及 Rmax 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，此對後續之加工處理有正面助益。

表 5 不同溫度熱處理相思樹木材之表面粗糙度

Table 5 Surface roughness of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	粗糙度 (μm)		
	Ra	Rz	Rmax
未處理	12.36 (2.47)	45.15 (10.51)	92.51 (18.82)
130	9.80 (1.60)	39.63 (7.74)	77.78 (4.50)
160	11.30 (1.80)	45.57 (4.28)	84.60 (14.26)
190	9.13 (1.83)	34.34 (7.29)	61.69 (13.72)
220	8.32 (0.82)	36.57 (5.66)	72.58 (14.95)
250	11.62 (2.79)	51.55 (5.70)	85.59 (17.90)
280	9.76 (1.21)	40.01 (3.66)	86.74 (2.20)

()內為標準偏差值

不同溫度熱處理相思樹木材之接觸角如表 6 所示，不論木材之縱向、弦向或徑向，以水為液滴之接觸角均隨熱處理溫度之升高而增加，此係熱處理溫度愈高愈易使疏水性之木質素產生軟化而呈近似熔融狀態所致。

表 6 不同溫度熱處理相思樹木材之接觸角

Table 6 Contact angle of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理條件(°C)	接觸角(°)		
	縱向	弦向	徑向
未處理	36(3)	29(5)	28(4)
130	36(1)	38(2)	31(2)
160	42(2)	36(2)	40(3)
190	45(3)	45(6)	49(8)
220	67(5)	66(7)	64(11)
250	103(7)	82(1)	83(3)
280	111(4)	82(3)	85(5)

()內為標準偏差值

不同溫度熱處理相思樹木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)如表 7 所示。未處理材之 WAP 及 S 值分別為 69.79%及 19.18%，經熱處理後，木材之 WAP 值均較未處理材者低，而體積膨脹率亦隨熱處理溫度升高而明顯降低，以 280°C 處理者僅為 8.18%，又 ASE 值亦隨熱處理溫度之升高而增加，以 250°C 處理者即增至 44%以上，280°C 熱處理者更高達 53.53%。又在 65% RH 與 95%RH 環境下，不同溫度熱處理相思樹木材之抗吸濕效能(MEE)如表 8 所示，在兩種相對濕度環境下，熱處理材之平衡含水率均隨處理溫度升高而降低，而抗吸濕效能亦有相同結果，尤其在 220°C 以上處理者更具效果，以 220°C 者為例，在 65% RH 與 95%RH 下之 MEE 值分別高達 40.75 及 31.54%。由此觀之，木材經熱處理可有效降低其吸濕性，提高抗膨脹效能及抗吸濕效能，降低平衡含水率，進而提升木材尺寸安定性。此係木材熱處理時，因半纖維素等組成分熱裂解，或促進木質素衍生物與纖維素反應形成醚鍵鍵結，相對使具親水性之羥基減少所致。

表 7 不同溫度熱處理相思樹木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)

Table 7 Water absorption percent (WAP), volumetric swelling coefficient (S) and antismelling efficiency (ASE) of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	WAP (%)	S (%)	ASE (%)
未處理	69.79 (1.60)	19.18 (0.63)	—
130	64.89 (2.32)	16.22 (2.35)	19.66 (2.97)
160	66.39 (8.05)	16.52 (3.24)	21.94 (5.29)
190	64.57 (2.61)	14.95 (0.80)	22.62 (1.20)
220	63.79 (3.32)	14.94 (2.07)	24.99 (9.19)
250	68.06 (1.10)	10.87 (2.41)	44.57 (2.03)
280	66.88 (2.36)	8.18 (0.78)	53.53 (3.80)

()內為標準偏差值

表 8 不同溫度熱處理相思樹木材之抗吸濕效能(MEE)

Table 8 Moisture excluding efficiency(MEE) of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	65%RH		95%RH	
	EMC (%)	MEE (%)	EMC (%)	MEE (%)
未處理	8.75 (0.21)	—	20.00 (0.66)	—
130	8.45 (0.13)	4.27 (1.01)	19.67 (0.24)	2.18 (0.85)
160	7.98 (0.17)	10.18 (2.07)	19.16 (0.47)	4.08 (1.35)
190	7.58 (0.14)	14.40 (1.39)	18.33 (0.32)	8.00 (1.36)
220	5.22 (0.15)	40.75 (0.40)	13.72 (0.39)	31.54 (1.97)
250	4.81 (0.13)	43.84 (1.20)	9.83 (0.16)	50.67 (0.73)
280	5.15 (0.34)	40.62 (3.83)	9.76 (0.29)	50.71 (1.67)

()內為標準偏差值

表 9 為不同溫度熱處理及相思樹木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數(MOE)。結果顯示,在木材表面硬度方面,在較低溫(130、160 及 190°C)處理之木材硬度有隨溫度升高而上升之趨勢,但 220°C 以上處理者之硬度明顯降

低，此係以較低溫處理時，木材僅受到乾燥作用，而少產生化變化，隨含率降低其硬度值增加，若以更高溫度處理後，木材受熱降解作用使組織結構產生變化，硬度明顯降低。

靜曲強度試驗中，靜曲破壞係數(MOR)之結果與硬度性質相似，未處理材之 MOR 為 1108 kgf/cm²，以 130 及 160°C 熱處理者，因含水率降低而使強度增加，但 190°C 以上熱處理者之 MOR 則較未處理材低，且隨溫度升高而強度明顯降低，以 280°C 處理者僅剩 108 kgf/cm²，此係木材組成分尤其是半纖維素受熱裂解，且溫度愈高，熱裂解愈嚴重所致。而靜曲彈性係數(MOE)方面，除以 280°C 處理者稍低於未處理材者外，其餘溫度處理者則均較未處理材高，其中又以 190°C 處理者最高達 126×10³ kgf/cm²，此係熱處理過程木材之半纖維素產生裂解，使結晶纖維素含量相對增加，使木材結構中較堅硬纖維素-纖維素鍵結，取代具可撓性半纖維素-纖維素-半纖維素間之鍵結(Spiegelberg, 1966)所致，但更高溫處理則因纖維素亦開始熱裂解，導致強度下降。

表 9 不同溫度熱處理相思樹木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數 (MOE)

Table 9 Hardness, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	硬度 (Kgf/mm ²)			MOR (kgf/cm ²)	MOE (10 ³ kgf/cm ²)
	縱向	弦向	徑向		
未處理	7.2 (0.5)	5.2 (0.1)	4.4 (0.2)	1108 (13)	63 (7)
130	7.5 (0.2)	5.5 (0.3)	5.5 (0.0)	1325 (72)	80 (4)
160	8.4 (0.2)	5.6 (0.4)	5.3 (0.1)	1404 (66)	93 (12)
190	6.3 (0.5)	5.4 (0.6)	6.0 (0.5)	668 (29)	126 (12)
220	5.1 (0.3)	3.7 (0.1)	4.0 (0.4)	455 (5)	112 (19)
250	5.8 (1.1)	5.1 (0.4)	3.6 (0.5)	349 (34)	79 (11)
280	4.4 (0.3)	3.0 (0.3)	2.0 (0.2)	108 (19)	58 (7)

()內為標準偏差值

表 10 為不同溫度熱處理相思樹木材之元素分析結果，由表中顯示，木材經熱處理後元素碳含量增加，且隨處理溫度升高，碳元素含量愈多之趨勢，以 280°C 熱處理之相思樹木材，碳元素含量高達 63.15%。而氫元素及氧元素含量亦有隨熱處理溫度增加而降低之趨勢，其中又以 280°C 熱處理材中氫元素及氧元素含量最少，分別為 5.87 及 30.26%，而氮元素含量以 250°C 最多，其餘差異不大。此因木材於熱處理過程中會去除水分，而使木材內碳水化合物脫水生成醛類，另外在熱處理過程中，木材之半纖維素會產生脫酸反應，而生成醋酸等其他化合物，另外，亦可能產生進一步縮合反應，使元素氫及元素氧減少(Boonstra and Tjeerdsma, 2006)。

表 10 不同熱處理相思樹木材之元素組成

Table 10 Elemental composition of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	元素組成 (%)			
	C	H	N	O
未處理	50.62	7.62	0.16	41.19
130	49.79	6.71	0.20	43.38
160	53.12	6.45	0.13	40.25
190	48.96	6.37	0.14	43.92
220	52.78	6.80	0.15	40.25
250	56.15	6.06	0.43	37.01
280	63.15	5.87	0.20	30.26

不同溫度熱處理相思樹木材之熱重損失曲線(TGA)及導數熱重損失曲線(DTG)分別如圖 1 及圖 2 所示，再將其熱重損失參數整理如表 11。未處理及較低溫(190°C 以下)熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 300°C 及 350°C 左右，前者應為半纖維素之熱裂解，後者則為纖維素之熱裂解，而 220°C 以上熱處理者僅有一階段熱裂解，溫度約 350°C 左右，此為纖維素之熱裂解，由此結果得知，在 190°C 以下熱處理之木材尚含有半纖維素及纖維素，而 220°C 以上處理者

則半纖維素大部分以熱裂解而剩餘較多之纖維素，又所有木材之木質素應是在 350°C 以上之緩慢且大溫度範圍之熱裂解，因此在 DTG 圖中不易發現明顯降解峰。又 800°C 時之焦炭率則隨熱處理溫度之增加而提高，280°C 處理者高達 48.2%，此由表 9 中得知其有最高碳元素含量則可驗證。

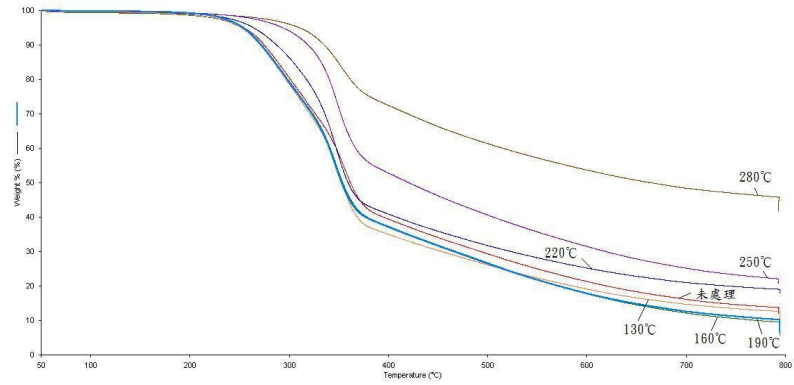


圖 1 不同溫度熱處理相思樹木材之熱重損失曲線

Fig. 1 TGA of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

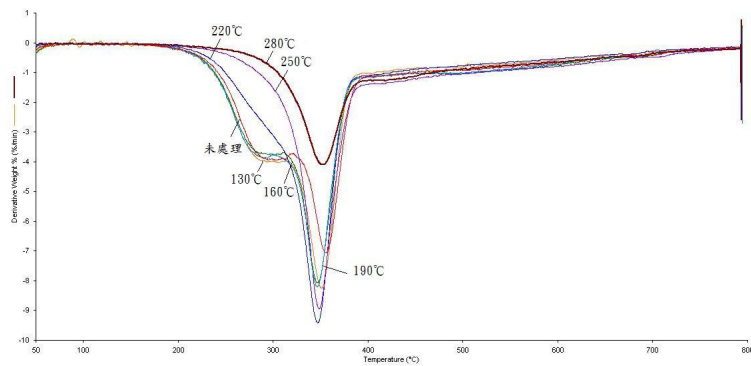


圖 2 不同溫度熱處理相思樹木材之導數熱重損失曲線

Fig. 2 DTG of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

表 11 不同溫度熱處理相思樹木材之熱重損失參數

Table 11 Parameters of TGA of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理 溫度 (°C)	第一階段			第二階段			800°C 焦炭率 (%)
	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	
未處理	276.6	295.3	14.1	349.5	357.2	42.6	13.9
130°C	289.1	310.5	17.5	341.9	348.8	40.4	12.6
160°C	294.9	297.2	18.4	344.4	345.5	51.4	10.0
190°C	296.7	301.3	24.0	347.6	349.9	48.1	10.3
220°C	—	—	—	340.3	349.7	46.6	19.6
250°C	—	—	—	340.7	350.1	34.7	22.2
280°C	—	—	—	341.8	356.3	21.1	46.2

圖 3 為不同溫度熱處理相思樹材之 FT-IR 光譜圖。其中， 898 cm^{-1} 代表半纖維素及纖維素之 pyranoid ring， 1510 cm^{-1} 代表木質素芳香骨架振動， 1700 cm^{-1} 代表羧基、酯基或未共軛醛類， 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} 之比值作為相對強度之比較，並整理如表 12 所示。試驗結果得知， A_{898}/A_{2900} 、 A_{1700}/A_{2900} 與 A_{3420}/A_{2900} 之相對強度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，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升高而減少，相對地，木質素含量會隨之增加，此由 A_{1510}/A_{2900} 之相對強度隨熱處理溫度升高而增加，而 800°C 之焦炭含量亦隨之增加，得以驗證。

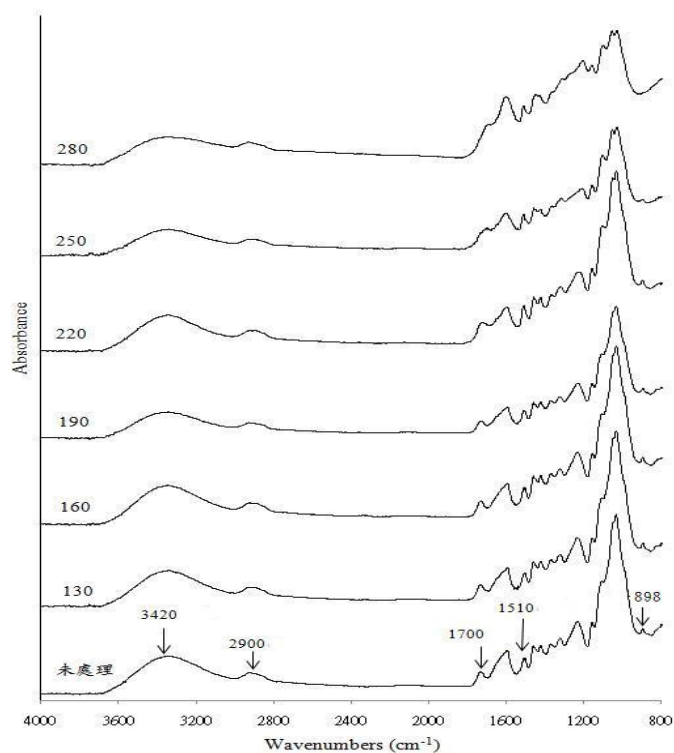


圖 3 不同溫度熱處理相思樹木材之 FTIR 光譜圖

Fig. 3 FTIR spectra of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

表 12 不同溫度熱處理相思樹木材之 898 cm^{-1} 、1510 cm^{-1} 、1700 cm^{-1} 及 3420 cm^{-1} 吸收峰之相對強度

Table 12 Relative intensities of peak absorbance at 898 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} , 1700 cm^{-1} and 3420 cm^{-1} to that at 2900 cm^{-1} from FTIR spectra of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	A_{898} / A_{2900}	A_{1510} / A_{2900}	A_{1700} / A_{2900}	A_{3420} / A_{2900}
未處理	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

(二) 不同溫度熱處理柳杉木材之特性

表 13 為柳杉木材之化學組成；其中，乙醇-甲苯抽出物有 3.77%， α -纖維素佔 40.70%，木質素佔 31.40%。柳杉木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 14 所示。木材質量損失隨熱處理溫度之升高而增加，其原因除了木材中之水分散失外，愈高溫處理則木材中之抽出成分及組成分，尤其半纖維素產生熱裂解所致，其中，以最低溫之 130°C 處理之質量損失為 12.93%，主要為木材中吸著水之散失，而最高溫之 280°C 熱處理後，質量損失達到 55.13%，此應是吸著水散失，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。又柳杉木材經熱處理後之含水率隨溫度上升而降低，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，第一層水分子仍不會脫離，此層含水率約 1.0~4.8%左右(劉正宇、盧崑宗，2002)。Akyildiz and Ates (2008) 以櫟木 (*Quercus petraea* Lieb.)、板栗 (*Castanea sativa* Mill.)、卡拉布里亞松 (*Pinus brutia* Ten.) 及黑松 (*Pinus nigra* Arnold.) 木材以 130、180 及 230°C 進行熱處理，並持溫 2 hr 及 8 hr，試驗結果平衡含水率值隨處理溫度升高而降低，本試驗結果與其相似。木材經熱處理後，又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 2 顯示，每塊柳杉木材之密度皆有些許差異，隨熱處理溫度之升高，密度降低率隨之增加，尤其 200°C 以上熱處理者，密度降低率達 10% 以上，此結果顯示，木材經熱處理後重量變輕，Gündüz 等人 (2008) 將土耳其黑松 (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) 加熱至 120、150 及 180°C，並持溫 2、6、10 hr 進行熱處理，試驗結果熱處理材密度降低率隨處理溫度之提升而增加，本試驗結果與其相似。

表 13 柳杉木材之化學組成

Table 13 Chemical composition of *C. japonica* wood

試材	乙醇-甲苯抽出物 (%)	全纖維素 (%)	α -纖維素 (%)	木質素 (%)
柳杉	3.77(0.04)	67.14(1.39)	42.70(0.54)	31.40(0.77)

()內為標準偏差值

表 14 不同溫度熱處理柳杉木材質量損失、含水率及密度

Table 14 Mass loss, moisture content and density of *A. confusa* wood heat-treated with different temperatures

熱處理 溫度 (°C)	質量 損失 (%)	含水率 (%)	密 度		
			熱處理前 (g/cm ³)	熱處理後 (g/cm ³)	降低率 (%)
130	12.93	7.53(0.22)	0.489(0.036)	0.469(0.011)	4.09
160	14.14	5.46(0.26)	0.509(0.027)	0.462 (0.015)	9.23
190	17.20	5.36(0.11)	0.489(0.026)	0.440 (0.018)	10.02
220	24.69	5.05(0.14)	0.480(0.023)	0.429 (0.018)	10.63
250	32.45	2.01(0.06)	0.516(0.040)	0.417(0.032)	19.19
280	55.13	1.12(0.17)	0.493(0.029)	0.322(0.008)	34.69

()內為標準偏差值

木材熱處理過程中水分會散失，而使木材尺寸產生收縮變化，由於組織構造上的差異，木材收縮具異方性，三個切面有不同之尺寸收縮率。由表 15 可發現，柳杉木材經熱處理過後，弦向之收縮最為明顯，且隨溫度升高而增加，以 280°C 處理者之最高收縮率可達 16.56%，徑向收縮率次之，而縱向者為最低。又弦向/徑向之比值以愈高溫(220°C 以上)處理者愈趨於一致，比值約為 2.4。

表 15 不同溫度熱處理柳杉木材弦向、徑向及縱向之尺度收縮率(%)

Table 15 Shrinkage ratio of tangential, radial, and longitudinal section of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	弦向 (%)	徑向 (%)	縱向 (%)	弦向/徑向
130	2.89(0.38)	0.92(0.46)	0.60(0.18)	3.14
160	3.34(0.61)	1.49(0.67)	0.81(0.31)	2.24
190	4.09(0.39)	1.50(0.40)	0.82(0.26)	2.73
220	7.14(0.95)	2.30(0.93)	1.68(0.09)	3.10
250	8.66(0.93)	3.86(1.21)	2.33(0.92)	2.24
280	16.56(1.7)	6.77 (1.37)	3.36(0.50)	2.45

()內為標準偏差值

不同溫度熱處理柳杉木材顏色變化如表16所示；未處理及熱處理柳杉木材之明度(L*)、紅綠軸(a*)及黃藍軸(b*)均為正值，但熱處理後3種顏色參數均有隨溫度升高而下降的趨勢，在明度差值方面，至以190°C處理者 ΔL^* 值降低明顯，顯示木材在此溫度處理後明度下降，同時 Δa^* 值、 Δb^* 值亦均為負值，顯示以190°C處理後木材顏色更偏綠及偏藍色，亦即木材顏色變更暗及更深色，而色差值(ΔE^*)亦有相同現象。Gündüz and Aydemir(2009)將土耳其鵝耳櫪(*Carpinus betulus* L.)加熱至170、190及210°C，並持溫4、8及12 hr進行熱處理，試驗結果熱處理材之顏色較未處理材暗，本試驗結果與此相似。且由本試驗結果可知，柳杉木材在190°C熱處理後，其組成分之半纖維素或部分木質素已開始熱裂解，同時產生糠醛(furfural)等著色物質(Boonstra and Tjeerdsma, 2006)，並已些微炭化，導致木材顏色明顯變深，但此深色更賦予木材厚重感。

表 16 不同溫度熱處理柳杉木材之顏色變化

Table 16 Color changes of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	顏 色						
	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
未處理	66.15	11.05	19.26	—	—	—	—
130	65.75	8.39	19.64	-0.40	-2.66	0.38	2.72
160	60.39	9.46	19.74	-5.76	-1.59	0.48	6.00
190	44.99	8.78	17.47	-21.16	-2.27	-1.79	21.36
220	36.37	6.75	11.28	-29.78	-4.30	-7.98	31.13
250	32.87	4.3	6.65	-33.28	-6.75	-12.61	36.23
280	25.27	1.85	1.79	-40.88	-9.20	-17.47	45.40

表 17 為不同溫度熱處理柳杉木材之表面粗糙度；未處理柳杉木材之中心線平均粗糙度(Ra)、十點平均粗糙度(Rz)及最大粗糙度(Rmax)分別為 9.08、67.66 及 36.82 μm ，經不同溫度熱處理後，雖然表面粗糙度值與不同處理溫度間並無一定之規則性，但柳杉木材平行木理之 Ra、Rz 及 Rmax 等表面粗糙度值均較未處理材低。Gündüz 等人 (2008) 試驗結果之 Ra、Rz 及 Rmax 等表面粗糙度值均較未處理材低，本試驗結果與此相似。

表 17 不同溫度熱處理柳杉木材之表面粗糙度

Table 17 Surface roughness of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	粗糙度 (μm)		
	Ra	Rz	Rmax
未處理	9.08(2.02)	67.66(20.82)	36.82(8.08)
130	4.81(1.39)	27.01(7.29)	16.38(2.17)
160	6.79(2.37)	39.11(14.02)	21.91(8.00)
190	7.35(2.57)	32.33(13.97)	27.98(11.91)
220	6.67(2.54)	32.16(13.97)	23.89(9.03)
250	8.19(3.14)	41.15(9.95)	20.40(5.89)
280	6.93(1.09)	43.29(9.13)	26.56(3.22)

()內為標準偏差值

未處理之柳杉材接觸角較相思樹者為高，此因針葉樹材含有較多樹脂所致，又不同溫度熱處理柳杉木材之接觸角如表 18 所示，不論木材之縱向、弦向或徑向，以水為液滴之接觸角均隨熱處理溫度之升高而增加，如同相思樹熱處理材，此係熱處理溫度愈高愈易使疏水性之木質素產生軟化而呈近似熔融狀態所致，且在相同熱處理溫度下，柳杉材之接觸角高於相思樹者，此係柳杉有較高含量之木質素所致。

表 18 不同溫度熱處理柳杉木材之表面接觸角

Table 18 Contact angle of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理條件(°C)	接觸角(°)		
	縱向	弦向	徑向
未處理	69	53	74
130	47	60	79
160	85	78	81
190	81	93	86
220	82	91	92
250	98	97	92
280	113	108	93

不同溫度熱處理柳杉木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)如表 19 所示。未處理材之 WAP 及 S 值分別為 320.9%及 10.8%，經熱處理後，木材之 WAP 值均較未處理材者低，而體積膨脹率亦隨熱處理溫度升高而明顯降低，以 280°C 處理者僅為 4.0%，又 ASE 值亦隨熱處理溫度之升高而增加，以 220°C 處理者即增至 55%以上，280°C 熱處理者更高達 63.33%。Bekhta1 and Niemz (2003) 將雲杉 (*Picea abies*) 升溫至 200°C，並持溫 2、4、6、8、10、12 及 24 hr 熱處理，再進行尺寸安定性試驗，試驗結果其弦向及徑向之尺寸膨脹率均隨熱處理溫度之提升而降低，本試驗體積膨脹率之結果與此相似。又在 65% RH 與 95%RH 環境下，不同溫度熱處理柳杉木材之抗吸濕效能(MEE)如表 20 所示，在兩種相對濕度環境下，熱處理材之平衡含水率均隨處理溫度升高而降

低，而抗吸濕效能亦有相同結果，尤其在 220°C 以上處理者更具效果，以 220°C 者為例，在 65% RH 與 95%RH 下之 MEE 值分別高達 51.81 及 54.04%。由此觀之，木材經熱處理可有效降低其吸濕性，提高抗膨脹效能及抗吸濕效能，降低平衡含水率，進而提升木材尺寸安定性。此係木材熱處理時，因半纖維素等組成分熱裂解，或促進木質素衍生物與纖維素反應形成醚鍵鍵結，相對使具親水性之羥基減少所致 (Kocaefe *et al.*, 2009)。

表 19 不同溫度熱處理柳杉木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)

Table 19 Water absorption percent (WAP), volumetric swelling coefficient (S) and antismelling efficiency (ASE) of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	WAP (%)	S (%)	ASE (%)
未處理	320.9 (8.7)	10.8(2.5)	—
130	301.1 (1.1)	10.2(2.7)	20.38(13.61)
160	228.9 (46.1)	9.7(1.2)	20.14(8.30)
190	200.7(3.1)	7.7(1.1)	28.46(9.95)
220	211.3 (26.4)	5.2(1.2)	55.94(7.41)
250	188.0 (26.5)	4.4(1.4)	61.63(13.90)
280	313.6 (33.5)	4.0(2.2)	63.33(20.05)

()內為標準偏差值

表 20 不同溫度熱處理柳杉木材之抗吸濕效能(MEE)

Table 20 Moisture excluding efficiency(MEE) of *C. japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度(°C)	65%RH		95%RH	
	EMC (%)	MEE (%)	EMC (%)	MEE (%)
未處理	8.94(0.27)	—	19.81(0.15)	—
130	8.57(0.32)	5.00(1.51)	19.16(0.21)	3.62(0.84)
160	8.08(0.19)	9.05(1.95)	17.51(0.16)	11.63(0.70)
190	6.64(0.09)	25.75(0.95)	14.38(0.04)	27.76(0.86)
220	4.39(0.10)	51.81(2.42)	9.11(0.34)	54.04(1.74)
250	4.06(0.18)	54.05(1.69)	7.05(0.30)	65.24(1.51)
280	4.03(0.08)	54.33(1.30)	6.65(0.14)	66.43(0.72)

()內為標準偏差值

表 21 為不同溫度熱處理及柳杉木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數 (MOE)。結果顯示，在木材表面硬度方面，在較低溫(130、160、190 及 220°C)處理之木材硬度有隨溫度升高而上升之趨勢，但 250°C 以上處理者之硬度明顯降低。Kocaefe 等人 (2009) 將美國北方捷克松 (*Pinus banksiana*) 以溫度 120、160、200、210、220 及 230°C 熱處理，試驗結果中 120°C 熱處理者硬度些微上升，而高溫熱處理者之硬度值為降低，本試驗結果與此相似。此係以較低溫處理時，木材僅受到乾燥作用，而少產生化變化，隨含水率降低其硬度值增加，若以更高溫度處理後，木材受熱降解作用使組織結構產生變化，硬度明顯降低 (Kocaefe *et al.*, 2009)。

靜曲強度試驗中，靜曲破壞係數(MOR)之結果與硬度性質相似，未處理材之 MOR 為 581 kgf/cm²，以 130 及 160°C 熱處理者，因含水率降低而使強度增加，但 190°C 以上熱處理者之 MOR 則較未處理材低，且隨溫度升高而強度明顯降低，以 280°C 處理者僅剩 19 kgf/cm²。此係木材組成分尤其是半纖維素受熱裂解，且溫度愈高，熱裂解愈嚴重所致。而靜曲彈性係數(MOE)方面，以 190°C 以上處理者低於未處理材者，其中以 160°C 處理者最高達 71×10³ kgf/cm²，次之為 130 與 190°C 處理者，則與未處理材相近，此係較低溫之熱處理過程中，木材之半纖維素產生裂解，使結晶纖維素含量相對增加，使木材結構中較堅硬纖維素-纖維素鍵結，取代具可撓性半纖維素-纖維素-半纖維素間之鍵結(Spiegelberg, 1966)所致，但更高溫處理則因纖維素亦開始熱裂解，導致強度下降。

表 21 不同溫度熱處理柳杉木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數 (MOE)

Table 21 Hardness, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	硬度 (Kgf /mm ²)			MOR (kgf/cm ²)	MOE (10 ³ kgf/cm ²)
	縱向	弦向	徑向		
未處理	2.72(0.18)	1.96(0.45)	1.50(0.33)	581(40)	63(2)
130	2.75(0.03)	1.59(0.11)	1.99(0.60)	711(34)	63(5)
160	3.05(0.11)	1.98(0.27)	2.23(0.09)	738(71)	71(6)
190	3.05(0.31)	2.06(0.12)	2.74(1.14)	509(90)	62(4)
220	3.32(0.23)	2.14(0.38)	2.22(0.16)	250(44)	55(4)
250	2.41(0.45)	1.34(0.41)	1.98(0.28)	123(28)	48(7)
280	—	1.07(0.98)	1.27(0.18)	19 (0)	5(1)

()內為標準偏差值

將不同溫度熱處理柳杉木材之熱重損失曲線 (TGA) 及導數熱重損失曲線 (DTG) 分別如圖 4 及圖 5 所示，並將熱重損失參數整理如表 22。柳杉木材乃由半纖維素、纖維素及木質素等三種高分子組成分所共同構成，由表顯示未處理及 250°C 以下熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 350°C 及 500°C 左右，前者應為殘餘半纖維素及纖維素之熱裂解，後者則為纖維素及木質素之熱裂解，而 280°C 以上熱處理者僅有一階段熱裂解，溫度約 500°C 左右，此為纖維素及木質素之熱裂解，且其反應起始溫度 (onset) 隨熱處理溫度提高而增加，由此結果得知，在 250°C 以下熱處理之木材尚含有半纖維素及纖維素，而 280°C 處理者則半纖維素大部分已熱裂解，纖維素也產生部分裂解，而剩餘較多之木質素，又所有木材之木質素應是在 400°C 以上之緩慢且大溫度範圍之熱裂解，因此在 DTG 圖 (圖 5) 中發現較大範圍之降解峰。由此可知熱處理會使木材半纖維含量降低，而若以 280°C 處理者，半纖維素及纖維素已產生大量降解，又木材吸濕過程中，非結晶區之半纖維素佔了非常重要的角色，也就是說木材吸濕多寡決定於半纖維素。木材經熱處理後，半纖維素中多醣類因溫度的作用，化學組成產生變化，減

少木材之親水基，降低木材吸濕性，增加其尺寸安定性，此結果可驗證表 18 及表 20 結果中，木材抗膨脹效能及抗吸濕效能之提升，並降低平衡含水率。

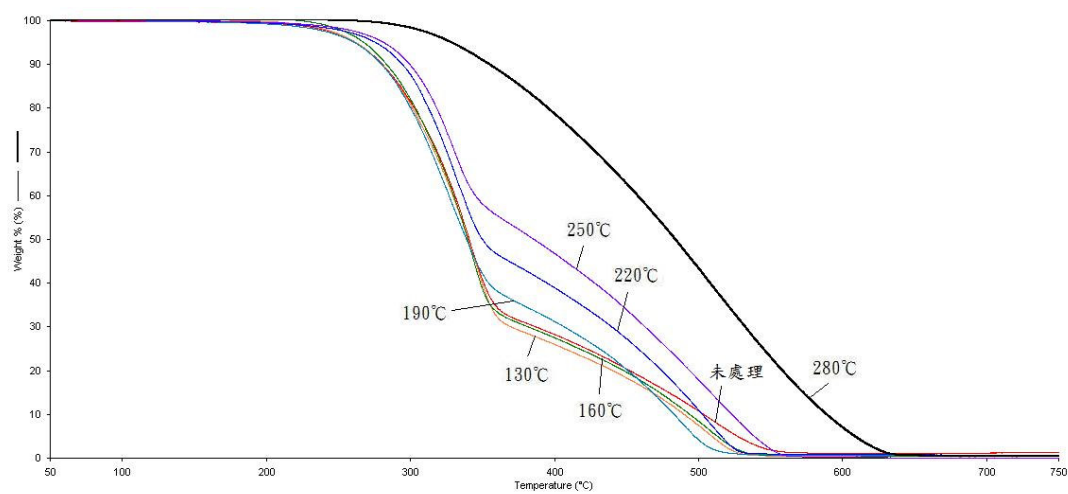


圖 4 不同溫度熱處理柳杉木材之熱重損失曲線

Fig. 4 TGA of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

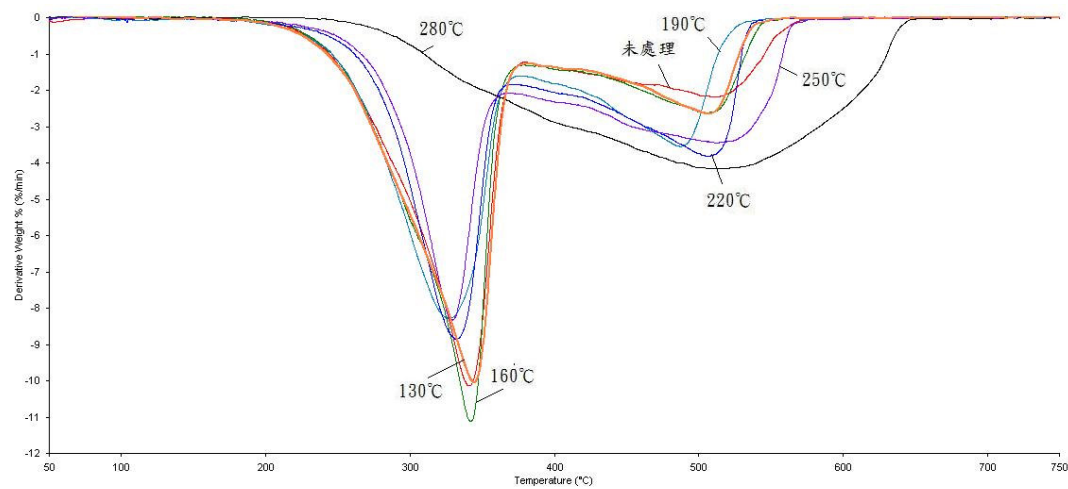


圖 5 不同溫度熱處理柳杉木材之導數熱重損失曲線

Fig. 5 DTG of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

表 22 不同溫度熱處理柳杉木材之熱重損失參數

Table 22 Parameters of TGA of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理 溫度 (°C)	第一階段			第二階段			750°C 殘餘率 (%)
	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	
未處理	325.9	356.8	31.4	466.6	542.8	7.3	1.43
130°C	325.6	360.1	44.1	470.9	524.5	7.7	0.30
160°C	328.9	355.9	62.5	475.5	489.4	8.7	0.47
190°C	329.4	330.1	53.0	481.4	495.3	6.1	0.60
220°C	331.2	339.6	65.9	496.7	497.7	13.6	1.06
250°C	332.9	350.2	74.5	506.8	548.1	16.4	0.99
280°C	—	—	—	528.2	556.1	21.5	0.78

將不同溫度熱處理柳杉木材之FT-IR光譜如圖6所示，以變化較為輕微2900 cm^{-1} 處C—H伸縮振動作為標準吸收峰，計算上述特定吸收峰與2900 cm^{-1} 之比值作為相對強度比較，並整理如表23所示。其中，898 cm^{-1} 代表半纖維素及纖維素之pyranoid ring，1510 cm^{-1} 代表木質素苯環特定吸收峰，1740 cm^{-1} 代表非共軛羰基（Nonconjugated Carbonyl, C=O），3420 cm^{-1} 代表羥基（OH stretching），結果得知，半纖維素及纖維素之pyranoid ring (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，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升高而減少，而木質素相對含量會隨之增加，此由木質素 (A_{1510} / A_{2900}) 之相對強度值隨熱處理溫度升高而增加。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熱處理，再以FT-IR試驗結果半纖維素與纖維素之pyranoid ring、非共軛羰基及羥基特定吸收明顯降低，而木質素特定吸收有些微增加，本試驗結果與此相似。

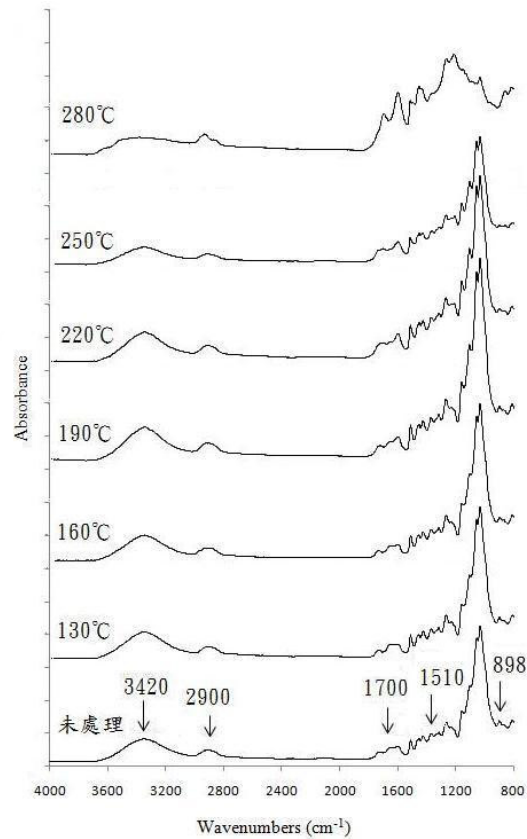


圖 6 不同溫度熱處理相思樹木材之 FTIR 光譜圖

Fig. 6 FTIR spectra of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

表 23 不同溫度熱處理柳杉木材之 898 cm^{-1} 、1510 cm^{-1} 、1700 cm^{-1} 及 3420 cm^{-1} 吸收峰之相對強度

Table 23 Relative intensities of peak absorbance at 898 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} , 1700 cm^{-1} and 3420 cm^{-1} to that at 2900 cm^{-1} from FTIR spectra of *C. Japonica* wood heat-treated with different temperatures

熱處理溫度 (°C)	A_{898} / A_{2900}	A_{1510} / A_{2900}	A_{1700} / A_{2900}	A_{3420} / A_{2900}
未處理	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

(三)不同厚度熱處理相思樹木材之特性

不同厚度相思樹木材以 190°C 熱處理，並持溫 3 hr，熱處理後之質量損失、含水率及密度變化如表 24 所示。熱處理材質量損失隨厚度提升而增加，木材厚度之差異會影響熱的傳導速度，厚度越小則熱傳導較為快速，除了使木材產生水分散失外，也使木材組成分受熱產生降解；而厚度較大者，熱處理過程所供給之熱能，大部分促使木材內水分散失，而使木材產生更明顯之質量損失。其中，厚度 3 cm 木材熱處理後，質量損失為 21.58%；而厚度 7 cm 熱處理者之質量損失為 35.06%。木材熱處理過程中，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 24 中顯示，每塊相思樹木材之密度均有些許差異，但木材經熱處理過後密度較未處理材低，此結果顯示，木材經熱處理後重量變輕。而密度降低率以 5 cm 厚者最高，達 19.84%。

表 24 熱處理不同厚度相思樹木材質量損失、含水率及密度

Table 24 Mass loss, moisture content and density of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理 材厚度 (cm)	質量 損失 (%)	含水率 (%)	密 度		
			熱處理前 (g/cm ³)	熱處理後 (g/cm ³)	降低率 (%)
未處理	—	12.00	0.882(0.007)	—	—
3	21.58	0.79	0.873(0.079)	0.843(0.000)	3.43
5	22.73	0.89	0.887(0.443)	0.711(0.020)	19.84
7	35.06	1.27	0.886(0.103)	0.792(0.010)	10.61

()內為標準偏差值

不同厚度熱處理相思樹木材顏色變化如表25所示；未處理及熱處理相思樹木材之明度(L*)、紅綠軸(a*)及黃藍軸(b*)均為正值，不同厚度熱處理材之明度差值隨木材厚度之增加而降低值減少，以厚度3 cm之 ΔL^* 值降低最為明顯，同時 Δa^* 值、 Δb^* 值亦均為負值，顯示木材經熱處理後，顏色更偏綠及偏藍色，亦即木材較其他厚度木材顏色更暗及更深色，而色差值(ΔE^*)亦有相同現象，且均以厚度

7 cm者之差值最低，而3 cm及5 cm者差異不大，顯示木材厚度愈薄者，熱處理後之木材顏色愈深。

表 25 熱處理不同厚度相思樹木材之顏色變化

Table 25 Color changes of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材厚度 (cm)	顏 色						
	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
未處理	51.26	10.67	19.73	—	—	—	-
3	26.97	3.43	4.29	-24.30	-7.24	-15.44	29.69
5	29.13	3.38	3.86	-22.14	-7.29	-15.87	28.29
7	33.39	8.12	12.23	-17.88	-2.55	-7.50	19.55

表 26 為熱處理不同厚度相思木材之表面粗糙度；未處理相思樹木材之中心線平均粗糙度(Ra)、十點平均粗糙度(Rz)及最大粗糙度(Rmax)分別為 8.38、60.66 及 33.91 μm ，不同厚度相思樹木材經熱處理後，雖然表面粗糙度值與不同厚度間並無一定之規則性，且偏差值頗大，但相思樹木材平行木理之 Ra、Rz 及 Rmax 等表面粗糙度值均較未處理材低，顯示熱處理材面更為平滑。又不同厚度相思樹熱處理材之接觸角如表 27 所示，一般而言，熱處理材厚度愈低者其接觸角愈高，其中以 5 cm 厚者有較高接觸角之趨勢。

表 26 熱處理不同厚度相思樹木材之表面粗糙度

Table 26 Surface roughness of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材厚度 (cm)	粗糙度 (μm)		
	Ra	Rz	Rmax
未處理	8.38(2.12)	60.66(16.02)	33.91(11.02)
3	5.04(1.72)	57.29(12.62)	26.93(9.16)
5	6.43(1.84)	56.86(14.55)	27.97(5.58)
7	6.07(1.12)	54.10(12.10)	31.60(8.87)

()內為標準偏差值

表 27 熱處理不同厚度相思樹木材之接觸角

Table 27 Contact angle of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

試材厚度(cm)	接觸角(°)		
	縱向	弦向	徑向
3	102(4)	84(2)	85(2)
5	95(10)	84(2)	97(2)
7	75(5)	62(9)	74(4)

()內為標準偏差值

熱處理不同厚度相思樹木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)如表 28 所示。未處理材之 WAP 及 S 值分別為 69.79%及 19.18%，經溫度 190°C，並持溫 3 hr 熱處理後，木材之 WAP 值均較未處理材者低，而體積膨脹率隨木材厚度之降低而減少，厚度 3 cm 熱處理者在浸水試驗中具有最小之體積膨脹率，僅為 5.43%。又 ASE 值亦隨厚度之減少而增加，以厚度 3 cm 熱處理者高達 68.73%，具最佳之抗膨脹效能。又在 65% RH 與 95% RH 環境下，不同厚度相思樹木材熱處理後之抗吸濕效能(MEE)如表 29 所示，在兩種相對濕度環境下，熱處理材之平衡含水率均較未處理材者為低，而抗吸濕效能以厚度 5 cm 熱處理者為最佳，其在 65% RH 與 95%RH 下之 MEE 值分別高達 52.70 及 50.62%。

表 28 熱處理不同厚度相思樹木材之吸水率(WAP)、體積膨脹率(S)及抗膨脹效能(ASE)

Table 28 Water absorption percent (WAP), volumetric swelling coefficient (S) and antismwelling efficiency (ASE) of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材 厚度(cm)	WAP (%)	S (%)	ASE (%)
未處理	69.79(1.60)	19.18(0.63)	—
3	67.49(4.09)	5.43(0.71)	68.73(5.33)
5	67.70(3.13)	6.26(1.34)	67.29(7.55)
7	77.61 (2.07)	6.97(1.54)	60.66(3.42)

()內為標準偏差值

表 29 熱處理不同厚度柳杉木材之抗吸濕效能(MEE)

Table 29 Moisture excluding efficiency (MEE) of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材 厚度(cm)	65%RH		95%RH	
	EMC (%)	MEE (%)	EMC (%)	MEE (%)
未處理	8.75(0.21)	—	20.03(0.66)	—
3	4.70(0.40)	46.29(2.96)	10.91(0.73)	46.74(2.48)
5	4.14(0.71)	52.70(1.96)	9.84(0.39)	50.62(1.98)
7	4.71(0.61)	46.17(3.00)	12.18(1.76)	41.65(3.61)

()內為標準偏差值

表 30 為熱處理不同厚度相思樹木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數 (MOE)。結果顯示，熱處理材表面硬度值隨木材厚度減少而降低，此係較小厚度木材在熱處理中，木材受熱較為均勻，半纖維素等組成分產生大量降解，使表面硬度較其他厚度熱處理者低，而厚度 7 cm 熱處理者因受熱產生乾燥作用，僅產生些微熱降解作用，使木材表面硬度值提高。

靜曲強度試驗中，靜曲破壞係數(MOR)之結果與硬度性質相似，即隨試材厚度減少而降低，以 7 cm 熱處理者之 MOR 達 495 kgf/cm²，3 cm 熱處理者之僅為 384 kgf/cm²。靜曲彈性係數(MOE)方面，也與 MOR 值具有相同的趨勢，也隨木材厚度減少而些微降低。

表 30 熱處理不同厚度相思樹木材之硬度、靜曲破壞係數 (MOR) 靜曲彈性係數 (MOE)

Table 30 Hardness, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材 厚度(cm)	硬度(Kgf /mm ²)			MOR (kgf/cm ²)	MOE (10 ³ kgf/cm ²)
	縱向	弦向	徑向		
3	3.37(0.38)	3.19(0.37)	3.30(0.39)	384(52)	104(14)
5	3.96(0.95)	3.46(0.30)	3.33(0.18)	461(35)	122(9)
7	4.19(0.50)	3.89(0.84)	3.42(0.52)	495(44)	126(16)

()內為標準偏差值

熱處理不同厚度相思樹木材之熱重損失曲線(TGA)及導數熱重損失曲線(DTG)分別如圖 7 及圖 8 所示，再將其熱重損失參數整理如表 31。不同厚度熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 320°C 及 550°C 左右，前者應為半纖維素及部分纖維素之熱裂解，後者則為部分纖維素及木質素之熱裂解，且第一階段之降解溫度會隨木材厚度減少而提高，由此結果得知，厚度 3 cm 木材在熱處理過程中，半纖維素及纖維素降解較多，尤其半纖維素因均勻受熱而產生大量降解，使其含量相對較少，因而使第一階段熱降解溫度提高，此溫度主要為殘餘少量半纖維素及纖維素降解所致。第二階段 3 種厚度者熱降解溫度差異不大，但 5 cm 及 7 cm 者有較寬之熱解溫度範圍，顯示在相同熱處理條件下，厚度愈厚者組成分受熱解者較少。

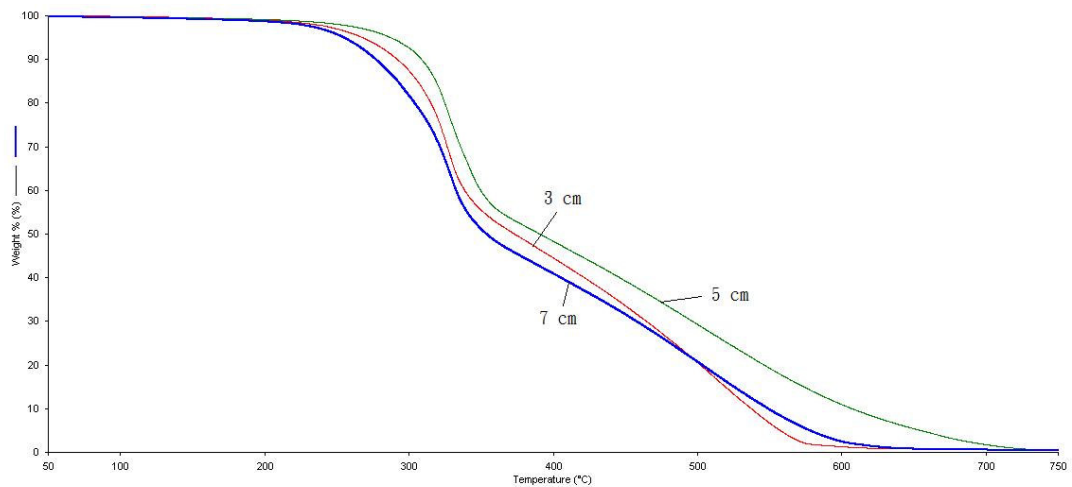


圖 7 熱處理不同厚度相思樹木材之熱重損失曲線
Fig. 7 TGA of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

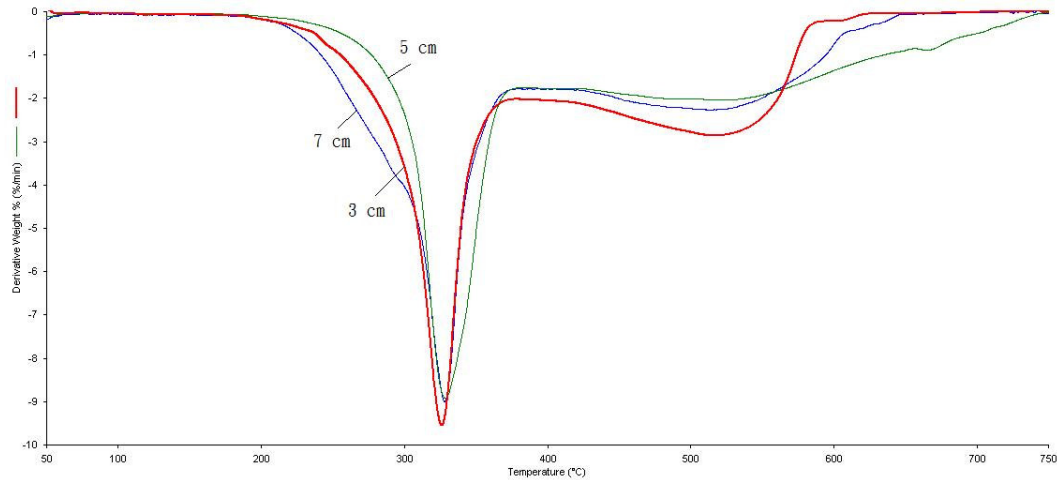


圖 8 熱處理不同厚度柳杉木材之導數熱重損失曲線
 Fig. 8 DTG of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

表 31 熱處理不同溫度柳杉木材之熱重損失參數

Table 31 Parameters of TGA of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理 材厚度 (cm)	第一階段			第二階段			750°C 殘餘率 (%)
	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	onset (°C)	peak (°C)	重量損 失率(%)	
3	326.2	330.1	78.4	504.9	549.7	6.8	1.2
5	305.2	318.1	73.3	496.5	563.5	11.5	0.7
7	299.0	317.2	65.5	473.8	561.6	7.6	0.7

圖 9 為熱處理不同厚度相思樹木材之 FT-IR 光譜圖。其中，898 cm^{-1} 代表半纖維素及纖維素之 pyranoid ring，1510 cm^{-1} 代表木質素芳香骨架振動，1700 cm^{-1} 代表羧基、酯基或未共軛醛類，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} 之比值作為相對強度之比較，並整理如表 32 所示。試驗結果得知，3 cm 熱處理者 A_{898} / A_{2900} 、 A_{1700} / A_{2900} 與 A_{3420} / A_{2900} 之相對強度較 7 cm 熱處理者為低，顯示 3 cm 熱處理者之半纖維素及纖維素含量亦會隨處理厚度降低而減少，而 7 cm 熱處理者可能產生受熱不均之問題，使內部組成分之半纖維素含量較其他厚度處理者高，相對地，木質素相對含量會隨之增加，此由 A_{1510} / A_{2900}

之相對強度隨熱處理厚度降低而增加。

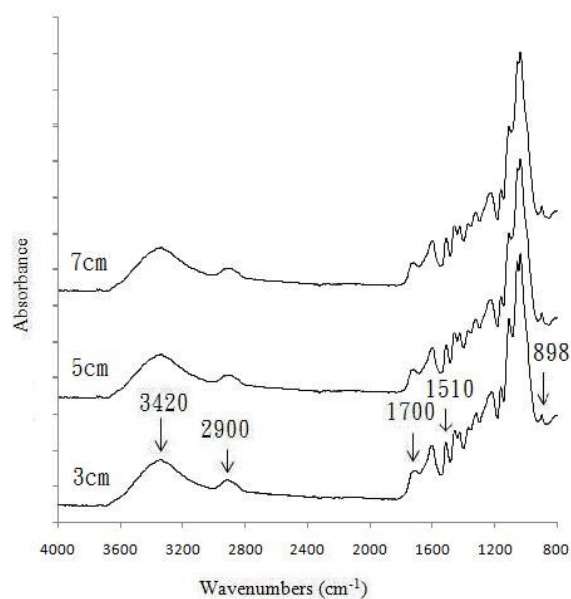


圖 9 熱處理不同厚度相思樹木材之 FTIR 光譜圖

Fig. 9 FTIR spectra of heat-treated *A. confusa* wood with different thicknesses

表 32 熱處理不同厚度相思木材之 898 cm^{-1} 、1510 cm^{-1} 、1700 cm^{-1} 及 3420 cm^{-1} 吸收峰之相對強度

Table 32 Relative intensities of peak absorbance at 898 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} , 1700 cm^{-1} and 3420 cm^{-1} to that at 2900 cm^{-1} from FTIR spectra of heat-treated *A. confusa* wood with different thickness

熱處理材 厚度(cm)	A_{898} / A_{2900}	A_{1510} / A_{2900}	A_{1700} / A_{2900}	A_{3420} / A_{2900}
3	2.933	2.021	1.123	1.562
5	2.923	1.960	1.149	1.829
7	3.100	1.859	1.187	1.836

四、結論

本試驗係探討在不同熱處理溫度之相思樹及柳杉木材之特性，及不同厚度相思樹木材以 190°C，持溫 3 hr 熱處理後之木材特性，試驗結果獲以下幾點結論。

- (一)相思樹與柳杉木材質量損失隨熱處理溫度之升高而增加，最高溫之 280°C 熱處理者可達到 55.13%；含水率隨熱處理溫度上升而降低，仍有少量水分子吸著；又隨熱處理溫度升高木材密度降低率隨之增加，尤其 190°C 以上熱處理者達 10% 以上；弦向/徑向之收縮率之比值以愈高溫(220°C 以上)處理者愈趨於一致，其值約為 2.4。
- (二)相思樹與柳杉木材以 190°C 以上熱處理後顏色更偏綠及偏藍色，亦即木材顏色變更暗及更深色；又熱處理可以降低粗糙度，使材面更為平滑；經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，降低平衡含水率，進而提升木材尺寸安定性，尤以 220°C 以上處理者更具效果。
- (三)相思樹與柳杉木材在較低溫(130、160 及 190°C)處理之木材硬度有隨溫度升高而上升之趨勢，但 220°C 以上處理者之硬度明顯降低；又 190°C 以上熱處理者之 MOR 則較未處理材低，且隨溫度升高而強度明顯降低，而靜曲彈性係數(MOE)除以 280°C 處理者稍低於未處理材者外，其餘均較未處理材高，其中又以 190°C 處理者為最高。
- (四)經 TGA 分析，相思樹未處理及較低溫(190°C 以下)熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 300°C 及 350°C 左右，而 220°C 以上熱處理者僅有一階段熱裂解，溫度約 350°C 左右。而熱處理柳杉木材經 TGA 分析，未處理及較低溫(250°C 以下)熱處理材產生兩階段熱裂解，分別發生在溫度 350°C 及 500°C 左右，而 280°C 以上熱處理者僅有一階段熱裂解，溫度約 550°C 左右。
- (五)在 FTIR 分析結果中，代表半纖維素及纖維素之 pyranoid ring (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}

2900 之相對強度隨熱處理溫度升高而增加。

- (六) 不同厚度相思樹木材熱處理後，抗吸濕性與抗膨脹效能均隨木材厚度減少而增加，厚度 3cm 熱處理者具有最佳尺寸安定性質，且表面顏色為最深，而硬度、MOR 及靜曲彈性係數(MOE)則隨厚度減少而降低，其中以厚度 7 cm 具有最佳強度性質。
- (七) 熱處理不同厚度相思樹木材之 TGA 分析中，熱裂解溫度分別在 320°C 及 550°C，且第一階段裂解溫度隨厚度減少而增加，750°C 之殘留率亦隨之增加。在 FTIR 分析結果中，代表半纖維素及纖維素 A_{898}/A_{2900} 、 A_{1700}/A_{2900} 與 A_{3420}/A_{2900} 之相對強度隨熱處理木材厚度減少而降低之趨勢，而代表木質素之 A_{1510}/A_{2900} 之相對強度則隨厚度減少而增加。
- (八)綜合以上結果，柳杉及相思樹在厚度 5 cm 及 190 °C 熱處理下，在木材尺寸安定性及機械性質可得最佳平衡。

五、參考文獻

- 劉正字、盧崑宗 (2002) 木材塗裝工程。藝軒圖書出版社 台北。p.11。
- Akyildiz, M. H. and S. Ates (2008) Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey. *Research Journal of Agriculture and Biological Science*. 4(6): 660-665.
- Beaumontt, O. and Y. Schwob (1984) Influence of Physical and Chemical Parameters on Wood Pyrolysis. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 23:637-641.
- Boonstra M. J. and B. Tjeerdsma (2006) Chemical analysis of heat treated softwoods, *Holz als Roh- und Werkstoff* 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.

- 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. *International Biodeterioration & Biodegradation* 62: 448-454.
- Gobakken, L. R and M. Westin (2008) Surface mould growth on five modified wood substrates coated with three different coating systems when exposed outdoors. *International Biodeterioration & Biodegradation* 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. *Bioresource Technology* 99: 2275-2280.
- Gündüz, G. and D. Aydemir (2009) Some physical properties of heated Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood. *Drying Technology* 27:714-720.
- Hakkou, M., M. Pétrissans, A. Zoulalian and P. Gérardin (2005) Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degradation and Stability* 89: 1-5.
- Hakkou, M., M. Pétrissans, P. Gérardin and A. Zoulalian (2006) Investigation of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability* 91: 393-397.
- Kocaefe, 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. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 20(3): 307-320.
- Manninen, A. M., P. Pasanen and J. K. Holopainen (2002) Comparing the VOC

- emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood. *Atmospheric Environment* 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.
- 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.
- 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* 65: 353-358.
- Spiegelberg H. L. (1966) The effect of hemicelluloses on the mechanical properties of individual pulp fibers. Thesis, The Institute for Paper Chemistry, Lawrence University, Appleton, Wisconsin.

期中簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
<p>1.本研究試材相思樹經氣乾後，裁切成5×5×33、5×5×15、3×3×15、3×3×1、3×3×0.5cm³等尺寸，但各種性質之測定係使用何種尺寸者，應在試驗方法中，及各尺寸大小對各種熱處理木材性質影響之探討加以說明。</p>	<p>各尺寸所對應之性質測定，已補充於各項試驗中，又試材厚度大小對熱處理後性質之影響，將於期末報告中呈現。</p>
<p>2.第6頁，最後一行公式，W應為W(%)。</p>	<p>已於報告中修正，謝謝委員指正。</p>
<p>3.表2，熱處理溫度130、160及190℃之熱處理材含水率分別為3.08、2.62及1.39%，220℃以上則在1%以下，含水率大小是否會影響TGA及DTG曲線，請加以說明。</p>	<p>理論上，在DTG圖中之100℃左右，會有一重量損失峰，且含水率越高者越明顯，但本試驗中包括未處理材，均未發現水分之重量損失峰，可能相對於其他組成分之損失，含水率太低而無法顯現，若降低試驗時之升溫速率，可能水分之重量損失峰會較明顯，將於後續試驗中確認。</p>
<p>4.本計畫試材相思樹之木材性質本已不錯，材質之安定性及強度能提升有限。建議就材性較差如低比重材種，會比安定性之提升較有意義。</p>	<p>本試驗採用樹種選定闊葉樹之相思樹及針葉樹之柳杉，純就學理上做一比較，實用上就如委員所言，應針對材性較差之材種做熱處理較具意義，但對相思樹而言，熱處理仍會增加其尺寸安定性及材色加深，讓木材更顯厚重感。又柳杉試驗結果將於期末報告中呈現。</p>
<p>5.190℃~350℃之熱處理之各項性質，在兼顧安定性及強度保留方面，結論是何溫度最具推薦意義，請加以說明。</p>	<p>整體而言，以190及220℃處理者，在木材尺寸安定性及機械強度之保留最為均衡；經探討190℃處理者延長處理時</p>

	間，而220°C者則縮短處理時間之木材性能改善效果，試驗結果發現，以190°C處理3 hr者，可得最佳之性能。此結果將於結案報告呈現。
6.木材熱處理後一些抽出成分滲出到材面或因加熱而惰化，可能影響未來膠合與塗裝性質，建議試驗項目增加「表面接觸角」之測定。	感謝委員指正。表面接觸角為熱處理材重要項目之一，將補充所有熱處理材接觸角之測定，結果將於結案報告呈現。

期末簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
1.熱處理對木材穩定性有改善效果，值得推廣，尤其針對造林蓄積最多之柳杉，更有意義。另相思樹係闊葉樹極有潛力之造林樹種，有改善其穩定性之必要，提供參考。	1.謝謝委員意見，相思樹熱處理已於期中報告提及不同溫度熱處理之結果，本期末報告針對其不同厚度熱處理之效果提出說明。
2.本試驗有關相思樹部分，係固定以190°C熱處理，來探討不同試材厚度的影響，建議未來可增加與柳杉190°C處理同厚度者做各種性質之比較討論。	2.本試驗亦將進行不同厚度柳杉之熱處理，此結果與不同升溫速率及處理材之防蟲、防腐及膠合與塗裝之研究，將於後續計畫進行。
3.本試驗熱處理溫度最高為280°C，惟第17頁文中一再出現280°C以上處理者之敘述，是否有其他另設條件之試驗，請加以說明。又280°C熱處理所發生裂解者大部分應是半纖維素，纖維素結構開始鬆懈，發生裂解者只是少部分，木質素的氧甲基約在200°C附近開始減少，250°C後則加速。	3.本試驗熱處理溫度最高為280°C，文中280°C以上之說法錯誤，已將「以上」刪除，感謝委員費心指正。又木材3種組成分之熱裂解誠如委員所言，本試驗亦有收集各溫度熱處理之木醋液，由其有機成分分析，將可得知各成分裂解程度。

<p>4.第 2 頁，中文摘要倒數 1~2 行，「柳杉仍以 190 °C 處理者，而相思樹則以厚度 5 cm，在處理材之尺寸安定性及機械性質強度可得最佳平衡」，建請修正為「柳杉及相思樹在厚度 5 cm 及 190 °C 熱處理下」，英文摘要與結論請一併修正。</p>	<p>4.已如委員指示，於中英文摘要中同時修正。</p>
<p>5.第 5 頁，試驗材料，以 5×5×33 (cm³) cm 表示試材尺寸，建議修正為 5 cm×5 cm×33 cm；第 19 頁，倒數第 6 行，木質素含量會隨之增加，此含量為絕對量或相對量，宜加以說明；第 21 頁，表 11 密度值，建請至小數點二位即可。</p>	<p>5. 5×5×33 (cm³) 已修正為 5cm×5cm×33 cm，並將木質素含量修正為木質素相對含量，但密度之表示法，SI 單位為 kg/m³，而本試驗以 g/cm³ 表示，與 SI 表示法較符合，又諸多文獻以小數點 3 位表示為多，故本試驗仍予保留，敬請委員見諒。</p>
<p>6.第 23 頁，第 6 行，在兩種相對濕度下，熱處理材之平衡含水率均較未處理材為低，但抗吸溼效能因無未處理者，故不可能有相同結果，建請查明。</p>	<p>6.感謝委員費心指正，已修正為「而抗吸濕效能以厚度 5 cm 熱處理者為最佳，」</p>
<p>7.表 2，熱處理前(後)密度之數值，建請至小數點二位即可。中文摘要第 17 行，FT-IR 分析中，代表半纖維素及纖維素 A898/A2900、A1700/A2900 及 A3420/A2900 之相對強度，語意不清，建請依第 19 頁，表 10 底下文字，第 6~7 行之敘述修正，及第 28 頁倒數第 3 行亦一併修正。</p>	<p>7.密度寫法保留如 5 之說明。其他於文中已修正為「代表半纖維素及纖維素之 pyranoid ring (A₈₉₈/A₂₉₀₀)、羰基化合物 (A₁₇₄₀/A₂₉₀₀) 與羥基 (A₃₄₂₀/A₂₉₀₀) 之相對強度值均較未處理材者為低」</p>
<p>8. 表 15，厚度 3 cm 與 7 cm 者之 EMC 各為 4.70% 與 4.71%，幾無差異，但其 MEE 卻相差甚多，7 cm 者應為 46.17%；</p>	<p>8.感謝委員細心訂正，的確計算錯誤，已於文中修正。</p>

3 cm者為 46.29，請查明。	
-------------------	--