

熱處理對柳杉及山毛櫸平切單板之物理機械性質影響

錢易琦¹ 楊登鈞² 洪克昌¹ 吳志鴻³

【摘要】本研究係利用不同溫度(120–260°C)及氣體環境(空氣及氮氣)對柳杉(*Cryptomeria japonica*)及山毛櫸(*Fagus sylvatica*)平切單板進行熱處理，同時，利用萬能強度試驗機、X-ray 繞射儀及色差計等儀器，探討熱處理對平切單板理學機械性質及結晶度之影響。試驗結果顯示，不論在空氣或氮氣環境下進行熱處理，木材之質量損失率及體積收縮率隨著熱處理溫度之提高而增加。另外，經由浸水試驗結果亦得知，當熱處理溫度為 260°C 時，木材具有較高之疏水性及尺寸安定性。至於機械性質方面，於空氣環境下，當熱處理溫度超過 200°C 時，試材之抗彎強度保留率則有顯著性的下降；而於氮氣環境下，當熱處理溫度達 260°C 時，試材之抗彎性質最差。而在木材表面性質方面，於空氣環境或氮氣環境下，熱處理木材之表面顏色分別自 180°C 與 200°C 開始呈現深色化，此外，試材表面會隨熱處理溫度增加而呈現較平滑之外表。另一方面，試材經過熱處理後，會因其非結晶區之多醣類成分的降解，而增加試材結晶度，但當熱處理溫度達 260°C 時，因纖維素結晶區開始降解，會進而降低試材結晶度。

【關鍵詞】熱處理、柳杉、山毛櫸、平切單板、物理機械性質。

Effects of Heat Treatment on Physicomechanical Properties of Japanese Cedar and Beech Sliced Veneers

Yi-Chi Chien¹ Teng-Chun Yang² Ke-Chang Hung¹ Jyh-Horng Wu³

【Abstract】In this study, *Cryptomeria japonica* (Japanese cedar) and *Fagus sylvatica* (Beech) sliced veneers were heated at different temperatures (120–260°C) under air or nitrogen atmosphere. Effects of heat treatment on physicomechanical properties of sliced veneers were evaluated by universal testing machine, X-ray diffractometer, and color difference meter, etc. These results showed that the mass loss and volume shrinkage percentage of the heat treated sliced veneers increased with increasing heat treatment temperature regardless of gas atmosphere. According to the results of soaking test, sliced veneers exhibited better dimensional stability and hydrophobic properties after heat treatment. When the heat treatment temperature exceeded 200°C under air atmosphere, the modulus of ruptures (MOR) of sliced veneers decreased significantly. In contrast, the veneers exhibited the lowest flexural properties at 260°C under nitrogen atmosphere. The color of sliced veneers darkened after 180°C and 200°C treatment under air and nitrogen atmosphere, respectively. Additionally, the surface of heated sliced veneers showed smooth significantly with increasing heat treatment temperature. On the other hand, the crystallinity of heat treated sliced veneers increased with an increase of heat treatment temperature due to the degradation of the polysaccharides in the amorphous region. However, when heat treatment temperature reached 260°C, a significant decrease of crystallinity of sliced veneers was observed because the cellulose degraded in the crystalline region.

【Key words】Heat treatment, Japanese cedar, Beech, Sliced veneers, Physicomechanical properties.

¹ 國立中興大學森林學系研究生。

Graduate Students, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

² 國立中興大學森林學系博士後研究。

Postdoctoral Fellow, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

³ 國立中興大學森林學系教授，通訊作者。

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding Author, E-mail: eric@nchu.edu.tw.

I、前言

木材為一種可再生性的自然資源，除具有高比強度、加工容易、調節環境溫濕度、吸音及防震等優異特性外，其自然的紋理外觀及柔和色澤，使其多年來廣泛應用在裝潢、建築及家具等工業，但大量的開發利用亦導致全球森林資源急遽減少。近年來，因環保意識提升及森林永續經營觀念之提倡，各國開始重視森林資源的重要性，紛紛限制天然雨林的砍伐，使得原木取得日趨困難。因此，合板、粒片板及纖維板等木質複合材，以及作為木質複合材表面裝飾用之木材平切單板 (Sliced veneer) 等製品之需求日益增加。此外，木材屬異方性之生物材料，於氣候多變的環境下使用時，除會因吸脫濕而使木材產生變形、翹曲及開裂等情形外，亦容易受到陽光、雨水及微生物之侵害，造成木材腐朽或劣化進而破壞木材結構。因此，大多需要進一步透過物理或化學處理的方法來改善木材性質，以擴展木材之應用範疇及延長木材之使用年限，來達到資源永續利用之目的。

早期，木材常利用油溶性藥劑如雜酚油 (Creosote)、五氯酚 (Pentachlorophenol) 以及水溶性藥劑，如：鉻化砷酸銅 (Chromated copper arsenate, CCA)、銅烷基銨化合物 (Alkaline copper quaternary, ACQ) 及銅唑化合物 (Copper azole, CuAz) 等進行木材保存處理。然而，木材經過藥劑處理後，雖能有效避免真菌及白蟻等生物性侵害，但試材中之藥劑成分易對人體及環境生物造成危害 (Hall, 2002; Katz and Salem, 2005)。同時，近年來隨生態保育意識的提升，歐美等國家都已明令禁止使用含重金屬類之保存藥劑，提倡以“無毒性”的方式來改良木材，故以物理方式的熱處理技術來進行木材改良則逐漸受到重視 (Deka *et al.*, 2000)。而在 1980 年代後期，歐洲國家之熱處理技術即有相當程度的發展，並有專利及商品化產品問世。一般而言，木材熱處理改良技術主要係以溫度 150–230°C，並於不同介質下，使木質材料之物理性質及化學結構發生永久性變化 (Bekhta and Niemz, 2003; Gündüz *et al.*, 2008; Korkut *et al.*, 2008)。綜合上述可以發現，目前木材熱處理技術及其相關之研究報告均已相當完善。然而，針對熱處理對木材平切單板表面性質及物理機械性質等影響之相關研究則較為缺乏，故實值得進一步

探討。因此，本研究即以針葉樹柳杉及闊葉樹山毛櫸之平切單板作為試驗材料，探討不同熱處理條件 (溫度及氣體介質) 對其表面性質及物理機械性質之影響，藉以尋求兼具提高單板外觀性質及降低其親水性之最適化熱處理條件。

II、材料與方法

(I) 試驗材料

本試驗分別選用針葉樹柳杉 (*Cryptomeria japonica*, Japanese cedar) (20–30 年生) 以及闊葉樹之山毛櫸 (*Fagus sylvatica*, Beech) (50–60 年生) 做為試驗材料，其中柳杉平切單板係取自於台大實驗林場，而山毛櫸平切單板則購自誌懋公司。試驗前將試材尺寸裁切成 57 mm (縱向) × 12 mm (弦向) × 3 mm (徑向) 備用。

(II) 熱處理材之製備

1. 空氣環境熱處理

本試驗先將實木置於 105°C 之烘箱中乾燥 48 h 後，以 10 °C/min 之升溫速率進行熱處理，熱處理溫躡分別為 120、140、160、180、200、220、240 及 260°C，而熱處理時間為 2 h。待試驗終了並冷卻至 70°C 後，即得到空氣環境下之熱處理材。

2. 氮氣環境熱處理

本試驗參考 Brosse 等人 (2010) 之試驗方法作細微修改。試驗時，先將實木置於 105°C 之烘箱中乾燥 48 h 後，於電子炭化爐 (CMF-25S, 汎晨, Taiwan) 中進行熱處理。熱處理前，先以 50 mL/min 速率通入氮氣，待 5 min 氮氣充滿整個爐體後，調整氮氣通入速率至 5 mL/min，並以 10 °C/min 之升溫速率進行熱處理，熱處理溫躡分別為 120、140、160、180、200、220、240 及 260°C，而熱處理時間為 2 h。待試驗終了並冷卻至 70°C 後，即得到氮氣環境下之熱處理材。

(III) 熱處理材之製備

1. 理學機械性質分析

(1) 質量損失率 (Mass loss)

量測熱處理前後試材之絕乾質量後，依下式計算試材之質量損失率。

$$\text{Mass loss (\%)} = [(W_0 - W_1) / W_0] \times 100$$

式中， W_0 為熱處理前試材之絕乾質量 (g)， W_1 為熱處理 2 h 後試材之絕乾質量 (g)。

(2) 體積收縮率 (Volume shrinkage)

量測熱處理前後絕乾試材之弦向、徑向及縱向絕乾長度 (mm)，並換算成體積後，依下式計算試材之體積收縮率。

$$\text{Volume shrinkage (\%)} = [(V_0 - V_1) / V_0] \times 100$$

式中， V_0 為熱處理前試材之絕乾體積 (mm^3)， V_1 為熱處理 2 h 後試材之絕乾體積 (mm^3)。

(3) 尺寸安定性

a. 吸水率 (Water absorption) 及吸水體積膨脹率 (Volume swelling)

將熱處理材於 105°C 之烘箱中乾燥 48 h 後，測定試材吸水前之絕乾質量 (W_{0h}) 及絕乾體積 (V_{0h})，將試材水平置入 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 之蒸餾水中，置入深度為距水面下 25 mm，待浸水 24 h 後，測定試材吸水前之質量 (W_{24h}) 及體積 (V_{24h})，並依下式計算試材之吸水率及吸水體積膨脹率。

$$\text{Water absorption (\%)} = [(W_{24h} - W_{0h}) / W_{0h}] \times 100$$

式中， W_{0h} 為試材吸水前之絕乾質量 (g)， W_{24h} 為試材吸水後之質量 (g)。

$$\text{Volume swelling (\%)} = [(V_{24h} - V_{0h}) / V_{0h}] \times 100$$

式中， V_{0h} 為試材吸水前之絕乾體積 (mm^3)， V_{24h} 為試材吸水後之體積 (mm^3)。

b. 抗膨潤效能 (Anti-swelling efficiency, ASE)

本試驗參照 Prakash 和 Mahadevan (2008) 之方法，將熱處理前後之試材置於燒杯並加入蒸餾水，隨後將燒杯置入玻璃乾燥器 (Desiccator) 中，以真空幫浦抽氣 30 min 後，回復常壓並靜置 1 h。之後，再經真空幫浦抽氣 30 min 及常壓浸水 24 h 後，測量試材長度、寬度及厚度，並依下式計算其體積膨潤係數 (Volumetric swelling coefficient, S) 及抗膨潤效能 (ASE)。

$$S (\%) = [(V_2 - V_1) / V_1] \times 100$$

$$\text{ASE (\%)} = [(S_u - S_m) / S_u] \times 100$$

式中， V_1 為絕乾狀態下試材之體積； V_2 為飽水狀態下試材之體積； S_u 為熱處理前試材之體積膨潤

係數 (%)； S_m 為熱處理後試材之體積膨潤係數 (%)。

(4) 抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 與抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)

本試驗於試驗前選用無節試材，先將試材置於 105°C 之烘箱中乾燥 48 h，待測量其長度、寬度、厚度及重量後，以試材厚度 16 倍之載重跨距及 1.28 mm/min 之載重速度進行檢測，紀錄試片之最大載重值及其經時載重及變形量，並依下式計算試材之絕乾抗彎強度及抗彎彈性模數。

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

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

式中， P 為最大載重 (N)； L 為跨距 (mm)； b 為試材寬度 (mm)； h 為試材厚度 (mm)； ΔP 為比例限界內的載重差值 (N)； ΔY 為 ΔP 相對應彎曲變形量 (mm)。

此外，為進一步探討不同熱處理條件對試材機械性質之影響，本試驗另依下列式子計算熱處理試材之抗彎強度保留率 (MOR retention ratio) 及抗彎彈性模數保留率 (MOE retention ratio)。

$$\text{MOR retention ratio (\%)} = (\text{MOR}_x / \text{MOR}_0) \times 100$$

$$\text{MOE retention ratio (\%)} = (\text{MOE}_x / \text{MOE}_0) \times 100$$

式中， MOR_0 及 MOR_x 分別為試材熱處理前後所測得之 MOR； MOE_0 及 MOE_x 則分別為試材熱處理前後所測得之 MOE。

2. 表面性質分析

(1) 表面顏色 (Surface color change)

試材表面顏色之測定採用 Minolta (CM-3600d, Japan) 之色差計 (Color difference meter) 進行測量，光源為 D_{65} ，測試窗直徑為 8 mm，視角為 10° 。測試時，將試材直接置於測試窗上，並依照國際照明協會所制定之 CIE LAB 色彩體系，測得 L^* 、 a^* 及 b^* 之顏色參數，並進一步計算 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 及 ΔE^* 等顏色參數。其計算公式如下：

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_0$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_0$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_0$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

式中， L^*_0 、 a^*_0 及 b^*_0 分別為熱處理前試材之明度值、紅綠值及黃藍值，而 L^*_1 、 a^*_1 及 b^*_1 則為熱處理後試材之明度值、紅綠值及黃藍值。

(2) 表面粗糙度 (Surface roughness)

試材表面粗糙度採用針觸式表面粗糙度儀 (Kosaka SE1700, Japan)，測量時，測取試材之中心線平均粗糙度 (Ra)、最大粗糙度 (Ry) 及十點平均粗糙度 (Rz) (觸針直徑 2 μm ，測量長度為 8 mm，測量速度為 1.0 mm/s)。

3. 儀器分析

(1) X-ray 繞射試驗 (X-ray diffractometry, XRD)

本試驗使用國科會貴儀中心 MAC science MXP18 (Japan) 之 X-ray 繞射儀進行分析。分析之樣品係採通過 200 mesh 之木質粉末。分析時，所用的光源為 $\text{CuK}\alpha 1$ (40 kV, 30 mA)，掃描角 (2θ) 為 2–35°。此外，分析所得之結果，則依下列式子計算試材之纖維素結晶度 (Crystallinity index, CrI)。

$$\text{CrI} (\%) = [(I_{002} - I_{\text{am}}) / I_{002}] \times 100$$

式中， I_{002} 為纖維素 002 結晶面之最大繞射強度 ($2\theta = 22^\circ$)，而 I_{am} 則為纖維素非結晶區之繞射強度 ($2\theta = 18^\circ$)。

(IV) 統計分析

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

III、結果與討論

(I) 不同熱處理條件對針闊葉樹平切單板之理學性質影響

表 1 為不同熱處理條件對木材平切單板熱處理後質量損失率及體積收縮率之影響。由表中結果可以得知，柳杉及山毛櫸平切單板於空氣環境下經不同溫度熱處理後，其質量損失率會隨著熱處理溫度提高而增加；其中，當溫度低於 160°C 時，柳杉及山毛櫸平切單板之質量損失變化皆不明顯，此原因主要係木材於較低溫度熱處理時，

僅有吸著水以及些許抽出成分發生蒸發及逸散。相對的，當熱處理溫度達 200°C 時，兩種樹種平切單板之質量損失率即有明顯增加之情形，其值分別為 3.3 (柳杉) 及 7.3% (山毛櫸)。一般而言，木材於此溫度下，主成分中之半纖維素即會發生熱降解，且降解所產生之酸性副產物亦會進一步降解非結晶區之纖維素 (Sivonen *et al.*, 2002)，進而造成木材平切單板質量損失顯著提升。此外，當溫度達到 260°C 時，柳杉與山毛櫸平切單板之質量損失率則分別高達 25.5 及 35.3%。其原因主要係於該溫度下進行熱處理時，除會進一步使木材中纖維素結晶區發生熱降解之外，木質素亦會發生明顯熱降解，導致質量損失更為明顯 (Windeisen *et al.*, 2009)。至於體積收縮率方面，由表中結果亦可發現，隨著熱處理溫度的提高，其試材之體積收縮變化隨之增加，當熱處理溫度超過 200°C 時，即有明顯體積收縮情形發生，其值分別為 1.3 (柳杉) 及 2.8% (山毛櫸)。而當熱處理溫度達到 260°C 時，兩者之收縮率則分別提高至 12.4 (柳杉) 及 17.0% (山毛櫸)。另一方面，於氮氣環境下熱處理結果與空氣下熱處理者具相似趨勢，在質量損失率方面，於熱處理溫度未達 200°C 時，並無統計上差異，柳杉及山毛櫸平切單板之質量損失率均小於 1%；而當溫度達 260°C 時，其值則分別增加至 17.7 (柳杉) 及 16.5% (山毛櫸)。而在體積收縮率方面，其值同樣隨著熱處理溫度的提高而增加，當溫度達 220°C 時，統計上即有顯著差異，此時柳杉及山毛櫸平切單板體積收縮率分別為 2.0 及 2.4%。而當熱處理溫度達 260°C 後，柳杉及山毛櫸平切單板之尺寸收縮率則分別上升至 8.3 及 10.4%。此趨勢與 Hakkou 等人 (2005) 之熱處理材質量損失試驗結果相似，同樣隨著熱處理溫度之增加而隨之增加。

由上述結果可得知，不論在空氣或氮氣環境下進行熱處理，其木材平切單板之質量損失率皆隨著熱處理溫度的提高而增加。當以空氣作為氣體介質時，因加熱環境中存有氧氣，故會加速木材於熱處理過程中之氧化反應，使熱降解反應較於氮氣環境下劇烈。同樣的，在體積收縮率亦有相同之趨勢，以空氣作為加熱介質時，其體積收縮變化較為劇烈。

表 1、不同熱處理條件下柳杉及山毛櫸平切單板之質量損失率及體積收縮率變化

Table 1. Mass loss and volume shrinkage of Japanese cedar and beech sliced veneers under air or nitrogen by various heat treatment temperatures

Species	Temperature (°C)	Air		Nitrogen	
		Mass loss (%)	Volume shrinkage (%)	Mass loss (%)	Volume shrinkage (%)
Japanese cedar	120	-0.2 ± 0.2 ^A	0.7 ± 1.6 ^A	0.1 ± 0.1 ^A	0.2 ± 0.3 ^A
	140	0.1 ± 0.1 ^A	-0.1 ± 0.3 ^A	0.2 ± 0.1 ^A	-1.0 ± 0.5 ^A
	160	-0.3 ± 0.2 ^A	-0.2 ± 1.0 ^A	0.2 ± 0.1 ^A	-0.3 ± 0.7 ^A
	180	1.0 ± 0.4 ^B	0.1 ± 0.8 ^A	0.3 ± 0.2 ^A	0.8 ± 0.7 ^A
	200	3.3 ± 0.4 ^C	1.3 ± 1.8 ^A	3.9 ± 1.9 ^B	2.1 ± 1.6 ^{AB}
	220	6.1 ± 0.6 ^D	3.3 ± 0.6 ^B	2.5 ± 0.6 ^C	2.0 ± 1.3 ^{AB}
	240	15.2 ± 2.0 ^E	7.2 ± 3.0 ^C	5.7 ± 0.6 ^D	2.6 ± 0.9 ^C
	260	25.5 ± 1.7 ^F	12.4 ± 1.9 ^D	17.7 ± 4.5 ^E	8.3 ± 1.9 ^D
Beech	120	0.9 ± 0.1 ^a	0.3 ± 0.9 ^{ab}	0.0 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.2 ^a
	140	-0.2 ± 0.2 ^a	-1.3 ± 1.1 ^{ab}	-0.5 ± 1.4 ^a	0.3 ± 0.8 ^a
	160	-0.6 ± 2.9 ^a	1.3 ± 2.5 ^{ab}	-0.2 ± 0.1 ^a	1.9 ± 1.1 ^{ab}
	180	1.5 ± 0.1 ^a	1.6 ± 0.6 ^{ab}	0.9 ± 2.2 ^a	-0.1 ± 1.9 ^{ab}
	200	7.3 ± 1.1 ^b	2.8 ± 1.1 ^{bc}	2.6 ± 3.6 ^b	2.2 ± 4.3 ^{bc}
	220	12.6 ± 1.1 ^c	5.4 ± 1.4 ^{cd}	6.7 ± 1.3 ^c	2.4 ± 0.8 ^c
	240	21.2 ± 1.9 ^d	10.8 ± 2.5 ^{de}	5.1 ± 1.3 ^d	2.3 ± 0.7 ^c
	260	35.3 ± 2.2 ^e	17.0 ± 2.0 ^{ef}	16.5 ± 4.6 ^e	10.4 ± 2.7 ^d

Values are mean ± SD ($n = 9$). Different letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$).

(II) 不同熱處理條件對針闊葉樹平切單板尺寸安定性之影響

由於木材屬多羥基之生物性材料，使得對水分具有相當大的敏感性，而木材經過熱處理後，能夠降低其吸水性並賦予木材較佳之尺寸安定性 (Boonstra and Tjeerdama, 2006)，故本試驗透過 24 h 浸水試驗探討不同熱處理溫度對其尺寸安定性之影響。試驗結果如表 2 所示，於空氣環境下未處理對照組 (Control) 柳杉及山毛櫸平切單板之吸水率分別約為 73.0 及 63.3%，而隨著熱處理溫度的提高其吸水率皆有逐漸降低之趨勢。其中，柳杉平切單板以溫度 180°C 以上進行熱處理者，其吸水率方與對照組間具有統計上差異；相對的，山毛櫸平切單板則以溫度 240°C 以上處理者，

方具統計上差異。此外，針闊葉樹平切單板皆以 260°C 處理者吸水率最低，其值分別約 47.0 及 38.5%。至於 24 h 吸水體積膨脹率方面，未處理柳杉及山毛櫸平切單板之體積膨脹率分別為 14.4 及 23.7%，而隨著處理溫度的提高此兩種試材之體積膨脹率則隨之降低。其中，柳杉與山毛櫸平切單板之熱處理溫度分別達 180 及 200°C 時，其體積膨脹率方與對照組間具顯著差異。而當熱處理溫度達 260°C 時，兩種樹種平切單板皆呈現最低之吸水體積膨脹率，其值分別為 4.0 (柳杉) 及 8.7% (山毛櫸)。另一方面，抗膨脹效能之試驗結果亦具有相同之趨勢，柳杉及山毛櫸平切單板皆隨著熱處理溫度的提高其抗膨脹效能亦隨之增加，顯示熱處理材具有良好之尺寸安定性；其中，又以

表 2、不同熱處理條件之柳杉與山毛櫸平切單板之吸水率、體積膨脹率及抗膨脹效能

Table 2. Water absorption, volume swelling and anti-swelling efficiency of Japanese cedar and beech sliced veneers under air or nitrogen by various heat treatment temperatures

Species	Temperature (°C)	Air			Nitrogen		
		Water absorption (%)	Volume swelling (%)	Anti-swelling efficiency (%)	Water absorption (%)	Volume swelling (%)	Anti-swelling efficiency (%)
Japanese cedar	Control	73.0 ± 6.7 ^A	14.4 ± 2.5 ^A	—	73.0 ± 6.7 ^A	14.4 ± 2.5 ^A	—
	120	69.3 ± 6.7 ^{AB}	13.4 ± 2.8 ^{AB}	20.5 ± 7.0 ^A	67.0 ± 10.4 ^{AB}	12.0 ± 0.8 ^{AB}	23.6 ± 4.3 ^A
	140	63.2 ± 4.3 ^{ABC}	12.4 ± 2.5 ^{ABC}	25.3 ± 9.2 ^{AB}	61.4 ± 9.0 ^{ABC}	11.7 ± 1.3 ^{AB}	22.7 ± 6.2 ^A
	160	60.6 ± 2.8 ^{BCD}	13.0 ± 2.6 ^{ABC}	30.8 ± 10.0 ^{AB}	60.1 ± 9.8 ^{ABCD}	10.2 ± 1.4 ^{BC}	26.4 ± 3.2 ^{AB}
	180	55.3 ± 4.2 ^{CDE}	9.4 ± 2.8 ^{BCD}	43.8 ± 7.8 ^{AB}	51.6 ± 8.6 ^{BCD}	10.4 ± 0.8 ^{BC}	34.2 ± 2.9 ^B
	200	51.7 ± 4.4 ^{DE}	8.7 ± 2.5 ^{CD}	52.8 ± 14.1 ^{BC}	45.6 ± 5.7 ^{CD}	10.9 ± 1.4 ^{BC}	44.5 ± 3.7 ^C
	220	55.7 ± 7.7 ^{CDE}	6.6 ± 1.2 ^{DE}	53.1 ± 8.5 ^{BC}	42.3 ± 4.1 ^D	9.5 ± 0.6 ^{BC}	58.1 ± 4.5 ^D
	240	57.8 ± 5.7 ^{CDE}	5.2 ± 1.2 ^{DE}	66.4 ± 5.1 ^C	46.7 ± 5.3 ^D	8.2 ± 1.2 ^{CD}	62.0 ± 6.5 ^D
	260	47.0 ± 6.1 ^E	4.0 ± 1.7 ^E	81.7 ± 19.5 ^D	51.4 ± 9.9 ^{CD}	6.1 ± 2.3 ^D	75.2 ± 4.9 ^E
Beech	Control	63.3 ± 5.4 ^a	23.7 ± 2.4 ^a	—	63.3 ± 5.4 ^a	23.7 ± 2.4 ^a	—
	120	61.9 ± 2.7 ^a	22.8 ± 2.9 ^a	22.6 ± 3.8 ^a	53.0 ± 9.5 ^{abc}	18.0 ± 3.2 ^{abc}	19.8 ± 4.1 ^a
	140	59.9 ± 3.1 ^a	22.3 ± 2.5 ^a	26.5 ± 5.3 ^a	60.6 ± 4.2 ^a	18.3 ± 2.6 ^{abc}	21.9 ± 2.8 ^a
	160	60.5 ± 4.2 ^a	25.1 ± 2.4 ^a	38.5 ± 5.5 ^{ab}	57.0 ± 4.4 ^{ab}	19.9 ± 2.5 ^{ab}	26.7 ± 4.7 ^{ab}
	180	59.5 ± 6.1 ^a	20.9 ± 2.2 ^a	44.0 ± 5.4 ^b	50.5 ± 7.6 ^{abcd}	15.2 ± 5.1 ^{bcd}	33.5 ± 3.4 ^b
	200	54.6 ± 6.4 ^a	15.4 ± 2.0 ^b	64.3 ± 6.8 ^c	44.0 ± 9.9 ^{bed}	15.6 ± 5.1 ^{bcd}	48.3 ± 6.5 ^c
	220	48.0 ± 5.3 ^{ab}	11.6 ± 2.3 ^{bc}	69.0 ± 5.7 ^c	44.6 ± 6.0 ^{bed}	13.2 ± 2.0 ^{cd}	60.3 ± 7.2 ^d
	240	38.5 ± 4.9 ^{bc}	10.1 ± 2.0 ^c	77.7 ± 7.7 ^c	38.3 ± 5.3 ^d	11.6 ± 1.7 ^d	63.7 ± 4.7 ^d
	260	38.5 ± 4.9 ^c	8.7 ± 2.1 ^c	79.8 ± 3.6 ^c	40.6 ± 7.6 ^{cd}	9.5 ± 1.7 ^d	65.6 ± 8.6 ^d

Values are mean ± SD ($n = 9$). Different letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$).

260°C 處理者具有最佳抗膨脹之效果，其值分別為 81.7 (柳杉) 及 79.8% (山毛櫸)。同樣地，在氮氣環境下處理者其吸水率亦呈現相同的趨勢，針闊葉樹平切單板皆隨著熱處理溫度的提高而隨之降低；其中，亦以 260°C 處理者具有最低之吸水率，其值分別為 51.4 (柳杉) 及 40.6% (山毛櫸)。此外，經 260°C 熱處理後，柳杉平切單板之吸水體積膨脹率則由 14.4% 降至 6.1%，而山毛櫸平切單板則由 23.7% 降至 9.5%。至於在抗膨脹效能方面，亦隨著熱處理溫度的提高而隨之增加；其中，仍以 260°C 處理者具有最佳之抗膨脹效能表現，柳杉及山毛櫸平切單板其值分別為 75.2 及 65.6%。而此試驗結果則與 Esteves 等人 (2008b) 以海岸松熱處理材進行抗膨脹效能試驗之結果相似。而造成上述結果之原因，主要係因為半纖維素於熱處理過程中發生熱降解，進而減少木材中之羥基。同時，非結晶區之纖維素亦因熱降解的發生，導致木材整體結晶度提高，而使水分不易

進入木材中 (Bhuiyan and Sobue, 2000)。另外，木質素在熱處理過程中，會與多醣類之熱降解產物行縮合反應，此亦可能使材料呈現較具疏水之特性 (Wikberg and Maunu, 2004; Kocaefe *et al.*, 2009; Brosse *et al.*, 2010)。

綜合上述結果可以得知，木材平切單板經過熱處理後，能有效降低其吸水性，並提高試材之尺寸安定性，且隨著熱處理溫度的提高其抗吸水性質亦隨之提高，其中又以空氣環境熱處理者具有更佳之抗膨脹效能。

(III) 不同熱處理條件對針闊葉樹平切單板之表面性質影響

1. 表面顏色變化

木材經過熱處理後，其表面顏色的變化，主要是與木材中主成分降解有關 (Sundqvist and Morén, 2002)。圖 1A、B 為柳杉平切單板於空氣與氮氣環境下，經不同溫度熱處理後之表面色差

值 (ΔE^*)、明度差值 (ΔL^*)、紅綠差值 (Δa^*) 及黃藍差值 (Δb^*) 之變化。由圖 1A 中結果可以得知，在空氣環境下，隨著熱處理溫度的增加 ΔL^* 值則隨之下降，顯示試材表面顏色有變深之情形，此趨勢與 Esteves 等人 (2008a) 試驗結果相似。而造成此現象主要係因為木材於熱處理過程中會產生具不飽和鍵或苯環結構之吸光產物，故造成熱處理材呈現較深色之外觀 (Chen *et al.*, 2010)。此外，以低於 180°C 之溫度進行熱處理時，試材表面 Δa^* 值與 Δb^* 值變化不明顯，但溫度超過 180°C 後， Δa^* 值與 Δb^* 值則呈現下降趨勢，顯示試材偏向藍綠色。另一方面， ΔE^* 值隨著熱處理溫度的提高而隨之增加，當溫度達 260°C 時， ΔE^* 值為 47.4，顯示試材以此高溫熱處理後其表面顏

色變化甚大。而圖 1B 則為柳杉平切單板於氮氣環境下熱處理之表面顏色變化，其各顏色參數值之變化大致上與空氣環境處理者具有相似之趨勢。然而，於氮氣環境下，惟有熱處理溫度達 200°C 後，其表面顏色才具明顯之變化。此外，於溫度 260°C 處理時， ΔE^* 值為 46.3，其值與空氣環境下處理者相當。

圖 1C、D 則為山毛櫸平切單板試材分別於空氣及氮氣環境下熱處理後之表面顏色變化。由圖中結果顯示，於空氣環境下熱處理其表面顏色變化較氮氣環境下熱處理者來得劇烈。其中， ΔL^* 值同樣隨著熱處理溫度的增加而下降，且變化趨勢亦較 Δa^* 及 Δb^* 值為大，顯示熱處理後之試材表面主要呈現暗色，此結果與 Brischke 等人 (2007)

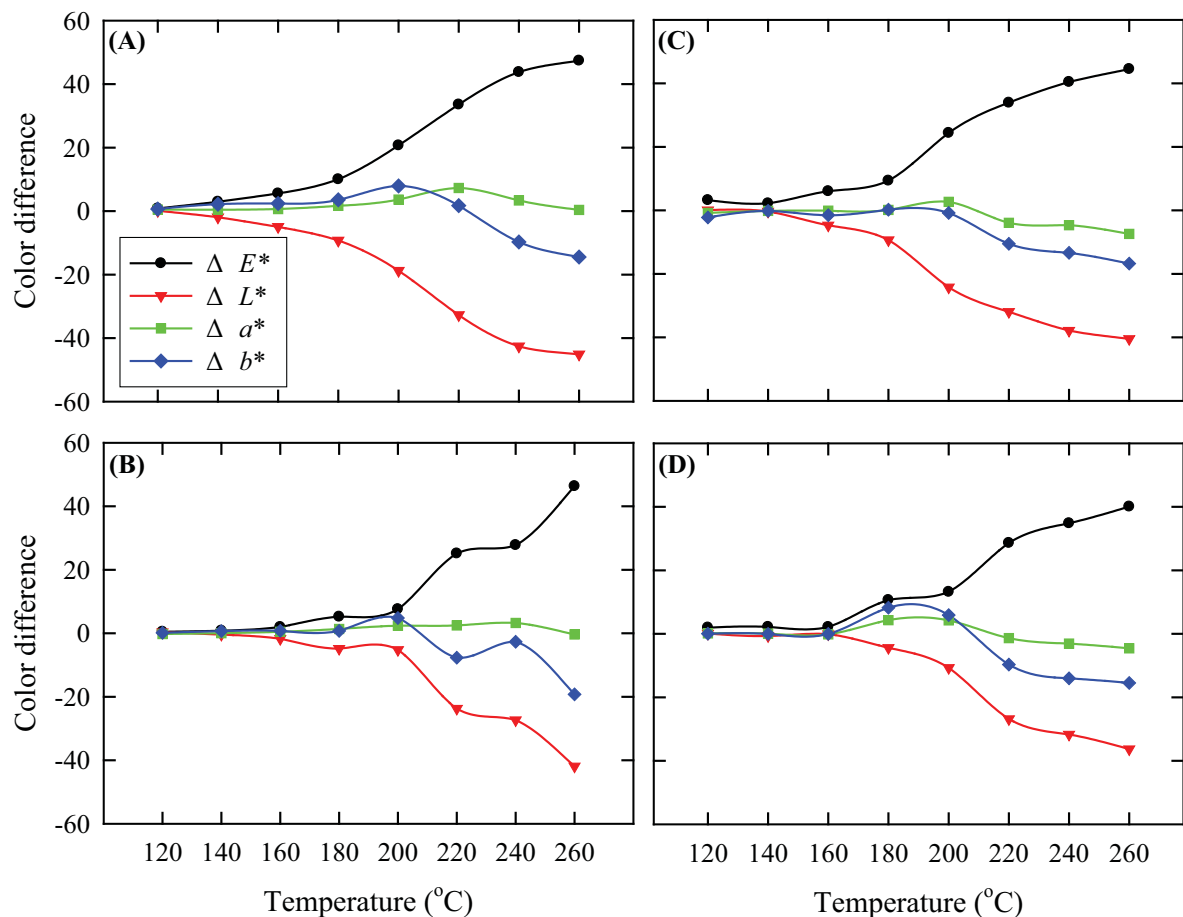


圖 1、不同熱處理條件之平切單板表面顏色變化 (柳杉於空氣 (A) 及氮氣 (B) 環境下；山毛櫸於空氣 (C) 及氮氣 (D) 環境下)

Fig. 1. Surface color changes of sliced veneers with various heat treatment conditions (Japanese cedar under air (A) or nitrogen (B); beech under air (C) or nitrogen (D)).

利用山毛櫸熱處理材進行表面顏色分析之試驗結果相似。此外，熱處理試材之 Δa^* 與 Δb^* 值於兩種不同氣體環境下之變化趨勢相似，皆為低溫度處理時 ($< 180^\circ\text{C}$) 變化不明顯，但當熱處理溫度超過 180°C 後，其參數值皆呈現明顯下降之情形。另外，試材於空氣及氮氣環境下進行熱處理後，其 ΔE^* 值皆隨著熱處理溫度的提高而增加；其中，當以溫度 260°C 處理時，於空氣及氮氣環境下其 ΔE^* 值分別為 45 及 40。至於上述木材經過熱處理後其表面深色化之原因，除半纖維素或纖維素於熱降解的過程中，會形成糠醛、羥甲基糠醛及脫水葡萄糖等呈色副產物之外 (Sundqvist, 2004)，木質素經過熱降解後亦會生成醌類等具發射團 (Chromophore) 及助色團 (Auxochrome) 之副產物，進而導致試材變色 (Tjeerdsma *et al.*, 1998; Mitsui *et al.*, 2001)。此外，木材之抽出成分因受熱降解而逸散或遷移至試材表面，亦會導致熱處理材之顏色加深 (Dubey *et al.*, 2011; Sundqvist and

Morén, 2002)。

2. 表面粗糙度

表 3 為柳杉及山毛櫸平切單板試材於不同氣體介質環境下進行熱處理後之表面粗糙度變化。由表中結果顯示，未處理柳杉平切單板之中心平均粗糙度 (Ra)、最大粗糙度 (Ry) 及十點平均粗糙度 (Rz) 之值分別為 5.2、27.3 及 15.7 μm 。其中，空氣環境下熱處理，Ra 值會隨著熱處理溫度的提高隨之降低。以 260°C 處理者為例，其 Ra 值最低，僅為 2.2 μm 。相對的，Ry 及 Rz 值之變化雖無隨熱處理溫度的提高而隨之降低，但經熱處理後之試材，其值均較未處理材為低。其中，以 260°C 處理者，其 Ry 及 Rz 值分別降低至 13.5 及 7.1 μm 。此外，對於闊葉樹山毛櫸平切單板之表面粗糙度變化亦呈現相同之趨勢，經過熱處理後平切單板之表面粗糙度皆有下降情形。Unsal 與 Ayırlım (2005) 以赤桉木作為試驗材料，分別以

表 3、不同熱處理條件之柳杉與山毛櫸平切單板表面粗糙度

Table 3. Surface roughness of Japanese cedar and beech sliced veneers under air or nitrogen by various heat treatment temperatures

Species	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Air			Nitrogen		
		Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
Japanese cedar	Control	5.2 \pm 1.1 ^A	27.3 \pm 6.1 ^A	15.7 \pm 5.1 ^{AB}	5.2 \pm 1.1 ^A	27.3 \pm 6.1 ^{AB}	15.7 \pm 5.1 ^B
	120	4.3 \pm 0.7 ^{AB}	21.3 \pm 5.1 ^{AB}	13.6 \pm 3.1 ^B	5.2 \pm 0.8 ^A	32.0 \pm 4.7 ^B	21.4 \pm 3.2 ^{AB}
	140	5.0 \pm 1.1 ^{AB}	28.0 \pm 5.6 ^A	16.6 \pm 4.5 ^{AB}	4.9 \pm 0.9 ^{AB}	38.2 \pm 5.4 ^A	25.0 \pm 3.8 ^A
	160	3.7 \pm 0.9 ^{BC}	22.1 \pm 6.8 ^A	14.1 \pm 6.5 ^B	4.1 \pm 0.7 ^{BC}	20.9 \pm 4.9 ^C	12.3 \pm 2.4 ^C
	180	3.7 \pm 1.1 ^{BC}	20.3 \pm 6.7 ^{AB}	12.4 \pm 3.5 ^{BC}	4.0 \pm 0.6 ^C	20.2 \pm 5.5 ^C	11.9 \pm 3.2 ^C
	200	3.5 \pm 0.6 ^{CD}	19.8 \pm 5.0 ^{AB}	11.0 \pm 3.1 ^{BC}	3.9 \pm 0.7 ^C	23.4 \pm 4.5 ^C	13.2 \pm 3.1 ^C
	220	3.2 \pm 0.4 ^{CD}	21.2 \pm 4.6 ^{AB}	20.9 \pm 3.3 ^A	3.6 \pm 0.8 ^{CD}	23.7 \pm 3.5 ^C	11.6 \pm 2.0 ^{CD}
	240	3.6 \pm 1.3 ^C	22.8 \pm 7.4 ^A	14.9 \pm 4.5 ^B	3.3 \pm 0.7 ^{CD}	22.3 \pm 3.1 ^C	11.1 \pm 1.9 ^{CD}
	260	2.2 \pm 1.4 ^D	13.5 \pm 8.5 ^B	7.1 \pm 5.3 ^C	3.2 \pm 0.8 ^D	19.4 \pm 3.9 ^D	9.8 \pm 2.9 ^D
Beech	Control	9.4 \pm 1.8 ^a	49.2 \pm 2.3 ^a	33.3 \pm 6.6 ^a	9.4 \pm 1.8 ^a	49.2 \pm 2.3 ^a	33.3 \pm 6.6 ^a
	120	7.6 \pm 1.0 ^b	42.2 \pm 4.7 ^{ab}	27.6 \pm 3.1 ^b	8.0 \pm 1.8 ^{ab}	45.0 \pm 3.8 ^a	29.3 \pm 3.7 ^{ab}
	140	6.1 \pm 0.8 ^c	38.1 \pm 5.0 ^b	24.5 \pm 3.8 ^{bc}	8.3 \pm 0.5 ^{ab}	40.3 \pm 5.3 ^{ab}	29.0 \pm 4.8 ^{ab}
	160	5.4 \pm 0.8 ^{cd}	34.9 \pm 5.2 ^{bc}	27.8 \pm 3.0 ^b	7.1 \pm 0.6 ^{bc}	38.4 \pm 3.3 ^{abc}	26.7 \pm 4.0 ^{abc}
	180	5.1 \pm 0.8 ^{cde}	29.9 \pm 6.0 ^{cd}	21.8 \pm 2.8 ^{cd}	6.3 \pm 0.6 ^{bed}	32.9 \pm 6.2 ^{bed}	24.2 \pm 3.8 ^{abc}
	200	4.7 \pm 1.2 ^{def}	27.1 \pm 5.9 ^{de}	18.5 \pm 5.4 ^d	6.2 \pm 1.0 ^{bed}	29.0 \pm 4.2 ^{cde}	20.6 \pm 3.4 ^{bcd}
	220	4.4 \pm 0.9 ^{def}	22.8 \pm 4.4 ^{def}	13.0 \pm 3.0 ^e	5.0 \pm 0.7 ^{cd}	25.2 \pm 5.6 ^{def}	16.6 \pm 3.6 ^{cd}
	240	4.0 \pm 1.0 ^{ef}	20.9 \pm 5.1 ^{ef}	11.1 \pm 2.7 ^e	4.4 \pm 1.1 ^d	21.1 \pm 3.3 ^{ef}	12.5 \pm 2.7 ^d
	260	3.3 \pm 0.6 ^f	18.0 \pm 3.5 ^f	9.2 \pm 3.0 ^e	3.9 \pm 0.2 ^d	19.4 \pm 3.7 ^f	10.5 \pm 3.5 ^d

Values are mean \pm SD ($n = 9$). Different letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$).

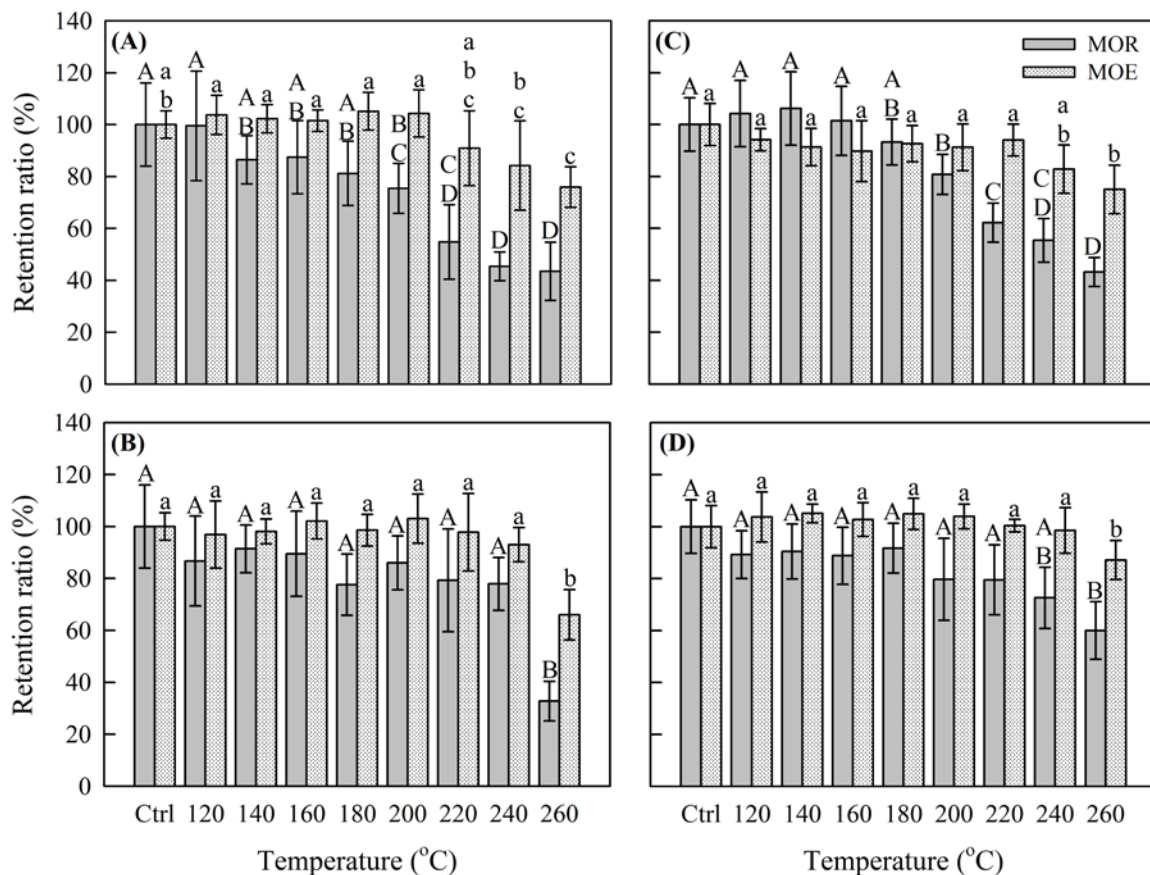


圖 2、不同熱處理條件之平切單板 MOE 及 MOR 保留率（柳杉於空氣 (A) 及氮氣 (B) 環境下；山毛櫸於空氣 (C) 及氮氣 (D) 環境下）

Fig. 2. MOE and MOR retention ratios of sliced veneers with various heat treatment conditions (Japanese cedar under air (A) or nitrogen (B); beech under air (C) or nitrogen (D)). Values are mean \pm SD ($n = 11$). Bars with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

120、150 及 180°C 之溫度進行熱處理，結果顯示， R_a 值會隨著熱處理溫度的提高隨之降低，顯示本試驗之結果與其試驗結果相似。而造成熱處理材表面粗糙度降低之原因，推測主要是因為試材經過熱處理後，其表面之微纖毛受熱而去除，進而使材面較平滑；此外，木質素經熱處理後會產生塑性，使得試材表面較緻密化，此亦會造成表面粗糙度的降低 (Hakkou *et al.*, 2005)。

另外，柳杉及山毛櫸平切單板於氮氣環境下經不同溫度熱處理後之表面粗糙度變化，由表 3 中結果顯示，試材之表面粗糙度隨熱處理溫度的提高而隨之降低。其中，以 260°C 處理者為例，柳杉及山毛櫸平切單板之 R_a 值皆為最低，其值分別為 2.2 及 3.3 μm 。此外，兩種樹種平切單板經過

熱處理後，其 R_y 及 R_z 值皆較未處理試材為低。同樣的，Korkut 與 Guller (2008) 以紅芽楓樹 (*Acer trautvetteri*) 做為試驗材料，分別以 120、150 及 180°C 之溫度，其試驗結果亦顯示隨著熱處理溫度的提高，平切單板試材之 R_a 、 R_y 及 R_z 值皆隨之降低。

(IV) 不同熱處理條件對針闊葉樹平切單板之機械性質影響

為探討不同熱處理條件對木材平切單板機械性質之變化，本研究對熱處理材進行抗彎試驗，而熱處理材之 MOE 及 MOR 保留率如圖 2 所示。於空氣環境下熱處理之絕乾柳杉平切單板 (圖 2A)，其 MOE 及 MOR 保留率會隨著熱處理溫度

的提高而下降。其中，當熱處理溫度達 200°C 時，MOR 保留率方與對照組具有統計上差異。而當以 240–260°C 熱處理時，試材之抗彎性質下降最為劇烈。相對的，柳杉平切單板於氮氣環境下熱處理之抗彎性質則如圖 2B 所示，當熱處理溫度低於 240°C 時，MOE 與 MOR 保留率並無統計上差異。但當溫度提高至 260°C 時，試材之抗彎性質即有明顯降低之情形，其 MOE 及 MOR 保留率分別為 66.0% 及 32.8%。另一方面，絕乾山毛櫸平切單板於空氣環境下熱處理溫度超過 200°C 時，試材之 MOR 保留率方與對照組間具有統計上之差異；其中，尤以 260°C 處理者其抗彎性質最低，MOE 及 MOR 保留率分別為 75.0% 及 43.2% (圖 2C)。而氮氣環境下山毛櫸平切單板熱處理材之抗彎性質 (圖 2D) 與空氣環境下柳杉平切單板熱處理材趨勢相似，以 260°C 處理者具有最低抗彎性質表現，其 MOE 及 MOR 保留率分別為 87.1% 及 60.0%。而此結果與 Kocafe 等人 (2009) 以北美傑克松所作試驗結果相似，木材經高溫 (>210°C) 熱處理後，其抗彎性質會顯著下降。造成此現象之原因，推測主要係因木材於熱處理過程中，半纖維素或纖維素發生熱降解，使結晶區發生破壞，故造成抗彎性質之降低 (Esteves *et al.*, 2007; Boonstra and Tjeerdama, 2006)。此外，比較不同氣體介質熱處理之試材發現，木材平切單板於空氣環境下熱處理後，其抗彎性質較氮氣環境熱處理者低。

(V) 不同熱處理條件對針闊葉樹平切單板之結晶度影響

為瞭解針闊葉樹平切單板經過不同環境及溫度熱處理後化學結構之變化，本研究以 XRD 對試材進行分析，其試驗結果如圖 3 所示。圖中，掃描角 (2 θ) 於 18° 及 22° 之訊號分別為木材纖維素之非結晶區與纖維素 002 結晶面之繞射峰。經過計算得知其結晶度 (CrI) 可以發現，柳杉平切單板於空氣環境下熱處理後 (140–220°C)，其結晶度有增加之趨勢，CrI 值由原先 31.3% (Control) 增加至 40.2% (220°C)。但當熱處理溫度達 260°C 時，其試材之結晶度則降低為 27.3% (圖 3A)。此外，柳杉平切單板於氮氣環境下熱處理之結晶度變化亦有相似之趨勢，隨著熱處理溫度的提高 CrI 值亦隨之增加 (140–220°C)，但當以 260°C 進行

熱處理後，其 CrI 值則降至 31.1% (圖 3B)。此試驗之結果與 Wikberg 及 Maunu (2004) 分別以雲杉及白楊木進行熱處理後試材結晶度之結果相似。而造成上述 CrI 變化之原因，主要係因為試材在較低溫度熱處理時，半纖維素或纖維素之非結晶區受熱降解，進而使木材整體結晶度提升；然而於較高溫度處理時，其纖維素之結晶區亦發生熱降解，故造成試材整體結晶度降低 (Akgül *et al.*, 2007; Boonstra and Tjeerdama, 2006)。至於未經熱處理山毛櫸平切單板 (Control) 之 CrI 值則為 36.9%，而當山毛櫸平切單板於空氣環境下熱處理後 (140–260°C)，CrI 值之變化趨勢並未與柳杉平切單板熱處理材相同，其值介於 36.9–39.9% (圖 3C)。同樣地，氮氣環境下山毛櫸平切單板熱處理材之結晶度變化與對照組間亦無顯著變化，其 CrI 介於 33.4–37.1% (圖 3D)。

IV、結論

近年，由於環保意識提升及森林永續經營之提倡，原木取得日趨困難。轉而對木質複合材及作用於其表面裝飾用木材平切單板之需求日益增加。而為了擴展木材之應用範疇及延長木材使用年限，大多需要透過物理或化學處理的方式改善木材性質。然而，目前對實木熱處理技術及其相關研究報告均已相當完善。但熱處理對木材平切單板表面性質及物理機械性質等影響之相關研究仍略顯不足。因此，本研究之目的主要係以柳杉及山毛櫸平切單板作為試驗材料，探討不同熱處理溫度 (120–260°C) 及氣體介質對其物理及機械性質之影響。研究結果顯示，不論氣體環境，熱處理材之質量損失、體積收縮率、抗膨脹效能、色差值皆隨著熱處理溫度的提高而增加，但表面粗糙度則隨之下降，呈現較平滑之材面。而在機械性質方面，於空氣環境下，當熱溫度超過 200°C 時，試材之抗彎強度保留率則有顯著之下降。同樣的，於氮氣環境下，抗彎性質亦隨著熱處理溫度的提高而下降，並以 260°C 處理者其性質最差。此外，木材經過熱處理後，能降低其吸水性，並提高尺寸安定性。另一方面，透過 X-ray 繞射儀分析試驗計算結晶度結果得知，當木材以較低溫度熱處理時 (140–220°C)，能使木材整體結晶度提高，而當熱處理溫度達 260°C 後，其結晶度則下降。

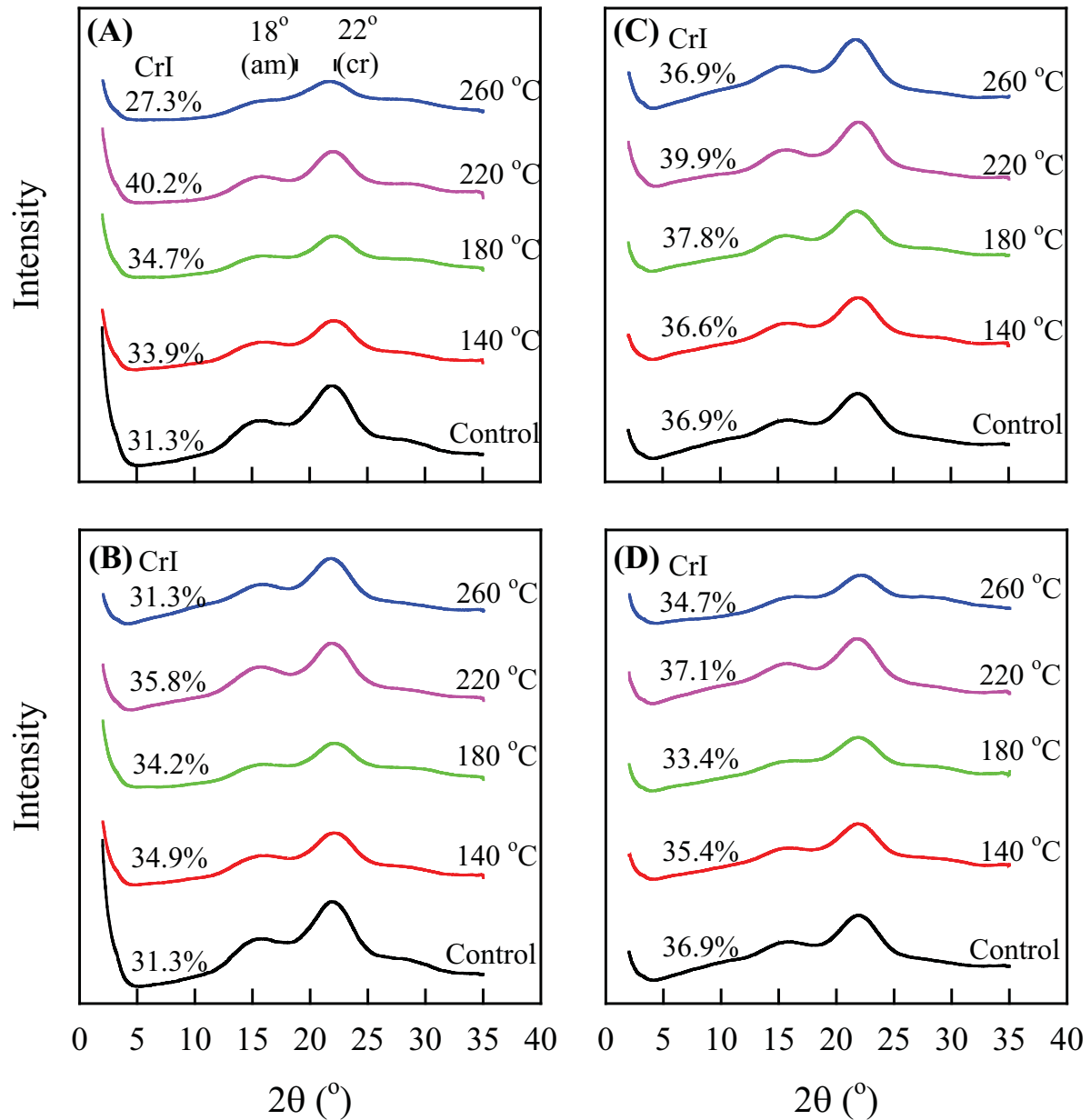


圖 3、不同熱處理條件之平切單板 X-ray 繞射圖（柳杉於空氣 (A) 及氮氣 (B) 環境下；山毛櫸於空氣 (C) 及氮氣 (D) 環境下）

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of sliced veneers with various heat treatment conditions (Japanese cedar under air (A) or nitrogen (B); beech under air (C) or nitrogen (D)). Values are mean \pm SD ($n = 11$). Bars with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

V、參考文獻

1. Akgül, M., E. Gümüşkaya, and S. Korkut (2007) Crystalline structure of heat-treated Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] and Uludağ fir [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmuelleriana* (Mattf.)] wood. Wood Sci. Technol. 41:281–289.
2. Bekhta, 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.
3. Bhuiyan, M. T. R. and N. H. N. Sobue (2000) Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist condition. J. Wood Sci. 46:431–436.
4. Boonstra, M. J. and B. Tjeerdsma (2006) Chemical analysis of heat treated softwoods. Eur. J. Wood Wood Prod. 64:204–211.
5. Brischke, C., C. R. Welzbacher, K. Brandt, and A. O. Rapp (2007) Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE $L^*a^*b^*$ color data on homogenized wood samples. Holzforschung 61:19–22.
6. Brosse, N., R. E. Hage, M. Chaouch, M. Pétrissans, S. Dumarçay, and P. Gérardin (2010) Investigation of the chemical modifications of beech wood lignin during heat treatment. Polym. Degrad. Stabil. 95:1721–1726.
7. Chen, H., C. Ferrari, M. Angiuli, J. Yao, C. Raspi, and E. Bramanti (2010) Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. Carbohydr. Polym. 82:771–778.
8. Deka, M., C. N. Saikia, and K. K. Baruah (2002) Studies on thermal degradation and termite resistant properties of chemically modified wood. Bioresour. Technol. 84:151–157.
9. Dubey, M. K., S. Pang, and J. Walker (2011) Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. Eur. J. Wood Wood Prod. 69:255–262.
10. Esteves, B. M., A. V. Marques, I. Domingos, and H. Pereira (2007) Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. Wood Sci. Technol. 41:193–207.
11. Esteves, B. M., I. J. Domingos, and H. M. Pereira (2008a) Pine wood modifications by heat treatment in air. Bioresources 3:142–154.
12. Esteves, B. M., A. V. Marques, I. Domingos, and H. M. Pereira (2008b) Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. Wood Sci. Technol. 42:369–384.
13. Gündüz, G., S. Korkut, and D. S. Korkut (2008) The effect 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.
14. Hakkou, M., M. Pétrissans., A. Zoulalian, and P. Gérardin (2005) Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polym. Degrad. Stabil. 89:1–5.
15. Hall, A. H. (2002) Chronic arsenic poisoning. Toxicol. Lett. 128:69–72.
16. Katz, S. A. and H. Salem (2005) Chemistry and toxicology of building timbers pressure-treated with chromate copper arsenate: a review. J. Appl. Toxicol. 25:1–7.
17. 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.
18. Korkut, S. and B. Guller (2008) The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of Red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. Bioresour. Technol. 99:2846–2851.
19. Korkut, S., M. S. Kök, D. S. Korkut, and T. Gürleyen (2008) The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple

- (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. *Bioresource Technol.* 99:1538–1543.
20. 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 color. *Holzforschung* 55:601–605.
 21. Prakash, G. K. and K. M. Mahadevan (2008) Enhancing the properties of wood through chemical modification with palmitoyl chloride. *Appl. Surf. Sci.* 254:1751–1756.
 22. Sivonen, H., S. Maunu, F. Sundholm, S. Jämsä, and P. Viitaniemi (2002) Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 56:648–654.
 23. Sundqvist, B. (2004) Colour changes and acid formation in wood during heating. Doctor Thesis, Lulea University of Technology.
 24. Sundqvist, B. and T. Morén (2002) The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 60:375–376.
 25. Tjeerdsma, B., M. Boonstra, A. Pizzi, P. Tekely, and H. Militz (1998) Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 56:149–153.
 26. Unsal, O. and N. Ayrilmis (2005) Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. *J. Wood Sci.* 51:405–409.
 27. Wikberg H. and S. L. Maunu (2004) Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydr. Polym.* 58:461–466.
 28. Windeisen, E., H. Bächle, B. Zimmer, and G. Wegener (2009) Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung* 63:773–778.