

透明木材的性質與應用潛力

高顯璋¹、張豐丞^{1*}

透明木材的發展契機與起源

過去百年，隨著社會與科技的快速發展，全球對於能源的需求量與消耗量劇烈地成長(Hoffert et al., 1998)，同時也對環境造成相當嚴重的影響。為了降低能源與資源消耗、減少環境危害，以生物性材料取代傳統石化產品的趨勢在社會中逐漸形成。

在全球的能源消耗量中，建築與住宅的能源消耗量佔比約30–40%，同時也代表其對於CO₂排放、溫室氣體增加有明顯的影響；另外，隨著人口不斷增加，現今的建築能源消耗量相較於過去十年更是明顯成長(Nejat et al., 2015)。因此，以材料觀點而言，發展對環境友善、低能源生產、降低能源消耗的建築材料是迫切的問題。

對於住宅與建築的能源消耗，窗戶所導致熱能散失是重要因素之一。現今玻璃是最被廣泛應用於窗戶的建材，然而，玻璃窗不僅有非常高的導熱率，容易使熱能流失，而且還有易脆、易眩光等特性，在使用上較不安全；更重要的是，玻璃被視為能源密集產業，每年全世界生產玻璃所排放之CO₂超過8600萬噸(Revitasari and Heru, 2018)。為解決導熱問題，業界陸續開發出多種不同方式提升隔熱性，如：隔熱膜、雙層玻璃等(Lee and Seo, 2018)，但材料本身之生產能源消耗問題仍未解決。因此，發展透明木材在近年成為備受矚

目的相關研究主題之一(Mi et al., 2020)。

透明木材的發展最早始於1990年代，Fink (1992) 首先提出透明木材的概念與製作方法，雖然在當時並未受到特別關注，但這項研究仍促進往後木材形態學、木材組織學的更多發展。直到約2016年，瑞典皇家理工學院教授Lars Berglund與其團隊，以及美國馬里蘭大學教授Liangbing Hu與其團隊各自相繼發表透明木材的研究及可能的未來應用，相關題材才受到世界關注。

透明木材是由木材改質並與高分子聚合物組成之生物複合材料，其中木材作為人類社會廣泛使用的天然資源，具備良好機械性能，而且擁有輕量、隔熱性、資源可再生、生物可降解等優點(Yan et al., 2018)；從碳排放的觀點來看，木質產品更是少數能夠完全抵銷生產過程碳排放的碳中和或負碳材料，更加符合現今追求環境永續的概念。而透明木材除了具有原本木材特性外，更具備生產低能耗且環境友善、透光性、霧度等特性(Fu et al., 2018)，因此有良好潛力取代傳統的玻璃材料，亦可以用來開發智慧窗戶、智慧屋頂、太陽能電池等綠色應用領域。

如何製作透明木材

探討如何製作透明木材，必須從木材的本質說起。木材的主要化學組成包含纖維素、半纖維素與木質素三種聚合物，分別

¹ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系

* 通訊作者(fcchang@ntu.edu.tw)

各佔有木材整體比例約40%、15~35%以及20~30% (Alén, 2000)。其中，木質素是一種含有許多酚基的複雜芳香族高分子，主要分佈於中膠層以及細胞壁(Plomion et al., 2001)。木質素的功能為提供樹木內部疏水表面，使其能夠傳輸水分到100公尺高的部位(Carder, 1995; Koch et al., 2004)，以及提供植物細胞壁乃至整棵樹木的剛性，支撐樹木生長到近百公尺。此外，木質素對於光吸收性也有重要影響。木材所呈現的褐黃色是由於其內部的吸收物質如：木質素與單寧等，主要吸收可見光中如：綠色、藍色、紫色等波長較短的光；其中木質素佔木質材料中約80~95%的光吸收量，因此去除木質素可以有效地降低木質材料的光吸收性(Li et al., 2018)。

而製作透明木材的可行性來自於木材本身的多孔性(Porosity)與組成份之分離。木材內部具有十分複雜的層狀結構，不同的層狀結構中分佈著不同大小尺度的孔隙，像是細胞腔(Lumens)的微孔結構，其孔隙直徑小於2 mm、壁孔(Pits)則包含中孔與大孔結構等。這種多尺度孔隙使得水分與養分得以順利傳輸，但對於光學性質而言，多孔性造成的固體與氣體交界面使得光線在此處被散射，同時也降低光的透射。

製作透明木材的方式可以簡要分為兩階段：「去木質化(Delignification)」以及「真空灌注樹脂」，如圖1所示。去木質化也就是將木質素從木材中分離出來，過去這項技術主要使用於傳統製漿造紙用途，其中最常見的

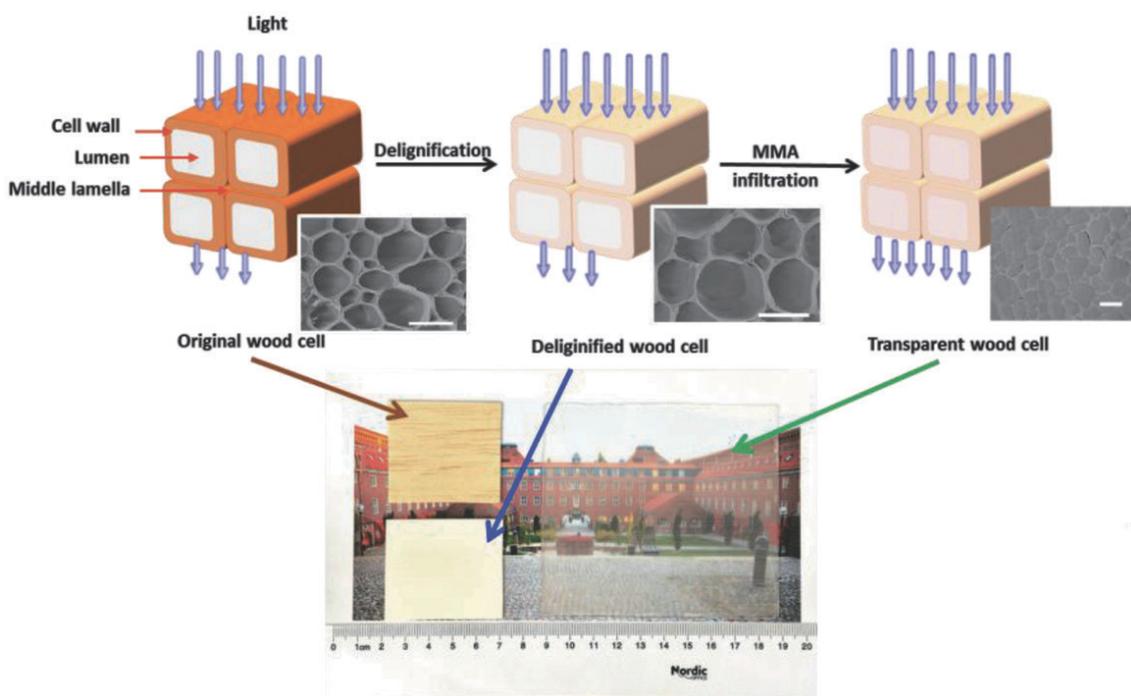


圖1 透明木材製作流程概要(Li et al., 2018)

方式多是利用木質素在鹼性環境中溶解度遠高於在中性環境的特性，將木材或是木屑加入鹼性藥劑浸煮，使木質素從木材中溶出。去木質化後，木材會略呈現紙白色，且可以維持其基本形態結構。微觀上，木材細胞壁孔隙變大，中膠層因缺少木質素而產生明顯空隙。這些孔隙產生許多空氣與細胞組織之間的邊界，由於纖維素($n \approx 1.53$)與空氣($n = 1$)之折射率無法匹配，因此當光通過材料時會發生嚴重的折射與散射，阻礙光的傳播。

接著透過真空的負壓，在木材內部灌注折射率與纖維素極為相近的透明樹脂如：環氧樹脂(Epoxy)與聚甲基丙烯酸甲酯(Poly(methyl methacrylate), PMMA)等，使樹脂在木材內部空隙聚合固化，填滿木材本身與去除木質素後的間隙，降低光的散射。

透明木材的力學性質

對於許多應用面向，材料的力學性質為重要考量因素之一。多篇研究顯示，當原本的木材製作成透明木材後，無論是縱向或橫向拉伸強度與彈性模數皆有提升，力學異方性則有所下降；另有研究以垂枝樺(*Betula Pendula*)單板與PMMA製作透明木材，強度甚至比原木直接浸泡樹脂固化的複合材料更好，顯示出去木質化木材與樹脂結合可以創造一加一大於二的效果。而若以玻璃為比較對象，抵抗衝擊性能可能是我們更關注的面向，根據研究，雖然透明木材在抗衝擊強度上不及玻璃，但破壞時的應變量卻是玻璃的百倍以上。從圖2可以發現當受到衝擊破壞時，透明木材不會像玻璃一樣碎裂，僅在受衝擊的局部區域留下受破壞的凹痕。

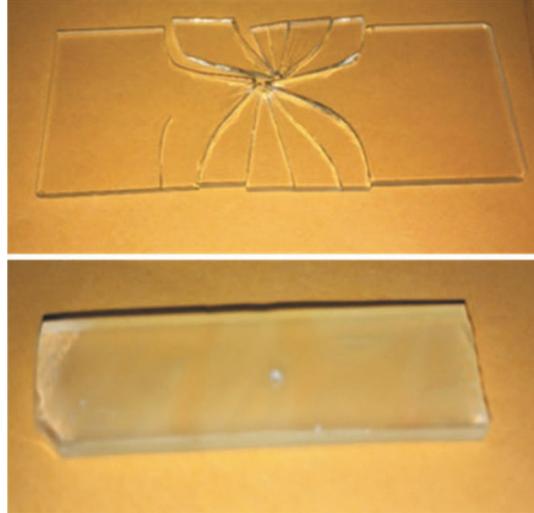


圖2 玻璃與透明木材受衝擊破壞後之結果。上圖為玻璃，下圖為透明木材(Li et al., 2016)

透明木材的光學性質

光學性質對透明木材而言十分重要，其中可分為透射率(Transmittance)與霧度(Haze)來探討，透射率代表當入射光垂直通過材料表面時，穿透材料的光(透射光)與總入射光的光強度比值；而透射光又可能發生偏離入射角度的現象，霧度則是表示偏離入射角度的光佔所有透射光的比例，也可說是透射光的擴散程度。

有許多因素影響透明木材的光學性質。樹種的不同造成木材密度、組成份與結構型態的差異，影響透明木材的光學性質，圖3為桤樹(Ash)、巴沙木(Balsa)、松樹(Pine)、樺木(Birch)四種不同樹種的透明木材，最高密度之桤樹透明木材透射率最低、而巴沙木可以達到85%的透射率，推論樹種密度與透射率有關，應源自於細胞壁的散射；此外可能也需要考量木材的導管、管胞大小，以及其木質化的程度。

透明木材的應用與未來潛力

目前已有許多利用透明木材發展出的相關應用，除了致力於開發高透射率、低霧度、隔熱性好、光穩定性佳的透明木材作為取代玻璃的建材，另有研究在透明木材內部混入量子點，製作具有一整面均勻光源的



圖3 不同樹種之透明木材

光致發光材料，可應用於發光建築元素與傢俱；又或者混入聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)使透明木材變成優秀的熱能儲存材料，未來可應用於節能建材等用途。

除此之外，在透明木材表面加上不同塗層可製作太陽能電池、電致變色裝置(Electrochromic devices, ECDs)，應用於主動調控式智慧窗戶與智慧屋頂(Lang et al., 2018)，如圖4所示。

綜合上述，透明木材是種兼具力學與光學性質的生物複合材料，在現今全球提倡永續環境，減緩氣候變遷的時代，這項材料不只被期望成為未來永續社會的玻璃窗替代產品，更為日後光學相關產品如：太陽能電池、智慧節能建材、居家照明等多種領域提供極有潛力的發展性。雖然透明木材目前處於學界研究階段，有許多技術障礙有待日後加以克服，但我們仍可期待這項創新材料在未來生物材料產業與光學領域發展出廣泛應用。(參考文獻請洽作者)

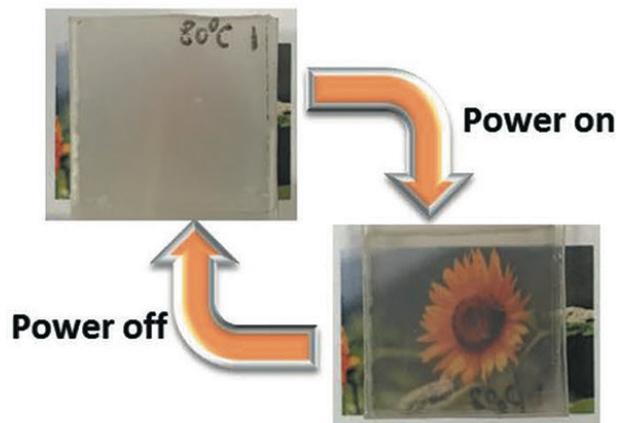
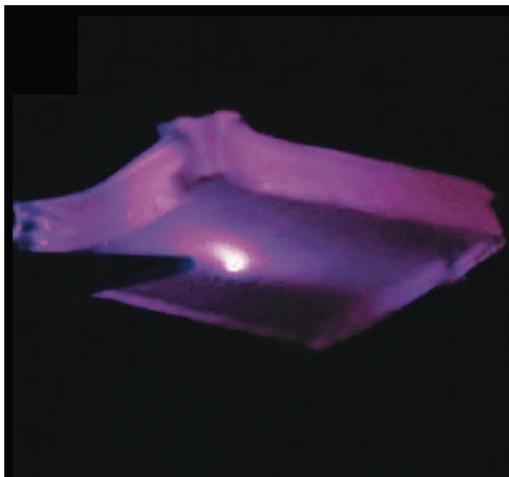


圖4 光致發光透明木材與智慧窗戶應用