

# 木質材料改質技術於固碳效能之潛力初探

林柏亨<sup>1\*</sup>、林振榮<sup>1</sup>、塗三賢<sup>1</sup>

## 前言

近年來，氣候變遷與溫室氣體排放已經受到各國政府、非政府組織NGO等單位廣泛的關注與討論。COVID-19疫情席捲全球下，人類經濟活動受到疫情影響，溫室氣體仍持續排放，極端氣候事件發生與氣溫亦無趨緩的態勢。溫室氣體 (GHG) 如二氧化碳、甲烷等在大氣濃度持續增加，同時也加劇地球暖化及海洋酸化之危機。

為因應相關危機，國際能源署 (IEA) 在去年發布「2050淨零：全球能源部門路徑圖」(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector)，做為全球能源系統達到淨零排放的預測可能路徑，希望有助各國制定能源相關政策，期待藉由各國政府制訂相關政策使2050全球排放之溫室氣體等於所吸收之溫室氣體。臺灣國家發展委員會亦制訂臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明及12項關鍵戰略：風電/光電、氫能、前瞻能源、電力系統與儲能、電力、碳捕捉利用及封存、運具電動化及無碳化、資源循環零廢棄、自然碳匯、淨零綠生活、綠色金融等，提供至2050年淨零碳排行動路徑，促進關鍵領域之技術研發與創新，帶動產業綠色轉型。

木質材料使用被認為是降低二氧化碳濃度和減緩全球暖化的一種重要手段。木質材料由於其植物生長進行光合作用將大氣中二氧化碳捕捉下來藉由生化路徑行成六碳糖，

這些單糖將經過其他的生化反應形成纖維素、半纖維素等木質材料主成分，支持植物體使其更有優勢與其他生物競爭。然而，木質材料面臨許多挑戰，例如木質材料在使用過程中會受到生物、物理、化學等因素的侵蝕、易燃等問題，使溫室氣體再度逸散於大氣中，因此有必要採用木質材料改質技術來延緩溫室氣體逸散於大氣中以提高其碳固存效益。近年來，全球各國都致力於減少碳排放，同時開發低碳經濟。為了提高木質材料碳固存效能，不斷有研究者致力於開發各種木質材料改質技術。木質材料改質技術是指對木質材料進行物理、化學或生物等方面的處理，以改善木質材料的性質和性能，從而提高木質材料的碳固存效益，希冀藉由木質材料改質技術提升材料之生命週期，進而提升應用潛力於碳固存效益及發展。

## 木質材料之特性

木質材料為生物質之一種，包含不同數量的纖維素、半纖維素、木質素和少量的其他提取物。木本植物物種的典型特徵是生長緩慢，由緊密結合的纖維組成，具有堅硬的外表面，而草本植物通常是單年生的，具有更鬆散的纖維，表明木質素的比例較低，它將纖維素纖維結合在一起，兩種材料都是多醣長鏈的天然聚合物。纖維素和木質素的相對比例是確定植物物種是否適合後續加工為能源作物的決定因素之一。纖維素是一種葡

<sup>1</sup> 林業試驗所森林利用組

\* 通訊作者 (afarmer@tfri.gov.tw)

葡萄糖聚合物，由(1,4)-D-葡萄糖單元的線性鏈組成，其中的單元以 $\beta$ -構型連接1-4，平均分子量約為100,000 (Pérez et al., 2002)。半纖維素是一種多醣混合物，幾乎完全由葡萄糖、甘露糖、木糖和阿拉伯糖等醣類，以及甲基葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸組成，平均分子量 $<30,000$ 。與纖維素相反，半纖維素是一種異質支鏈多醣，與每個纖維素微纖維的表面緊密結合。半纖維素與纖維素不同，它主要由木糖和其他五碳單醣組成。木質素可被視為一組無定形的、高分子量的、化學上相關的化合物。木質素的構成要素被認為是連接到六個碳原子的環上的三個碳鏈，稱為苯基丙烷。這些環上可能有零個、一個或兩個甲氧基基團，產生三種結構，分別稱為I、II和III。每種結構的比例取決於聚合物的來源，即結構I存在於植物中，如草；結構II存在於針葉樹的木質材料中；而結構III則存在於落葉木質材料中。纖維素通常是最大的部分，約占生物質重量的40-50%；半纖維素部分佔材料重量的20-40%。木本和草本植物物種都有特定的生長條件，基於土壤類型、土壤濕度、營養平衡和陽光，這決定它們對特定地理位置的適合性和生產性生長速度(圖1)。

木質材料為生物材料之一種，具有異方性、多孔性及吸濕性之生物性有機材料，易受到陽光及降雨等非生物性因子，以及細菌、真菌、蛀蟲、白蟻等生物性因子危害而劣化，進而限制其應用範疇。於戶外使用時易受到環境及微生物之影響，而產生變形、翹曲、開裂及腐朽變色等情形(圖2)，是因為木質材料具有特殊的物理和化學特性，其性質在不同方向上可能會有所不同，木質材料的縱



圖1 木質生物材料—柳杉 (林柏亨 攝)



圖2 生物因子使木質材料劣化 (林柏亨 攝)

向強度通常比橫向強度更高。木質材料具有多孔性，其結構由細胞壁和細胞孔組成，並且存在於不同大小的孔洞和管道中(圖3)。這使得木質材料容易吸收水分，也容易釋放水分，因此具有吸濕性。因此，為了延長木質材料的使用壽命與其生命週期，可藉由採取一些改善措施改變其部分性質，如環境友善改質技術等，以提高木質材料的耐久性和可持續性。

## 木質材料改質技術現況

隨著對環境可持續性與環保意識提升

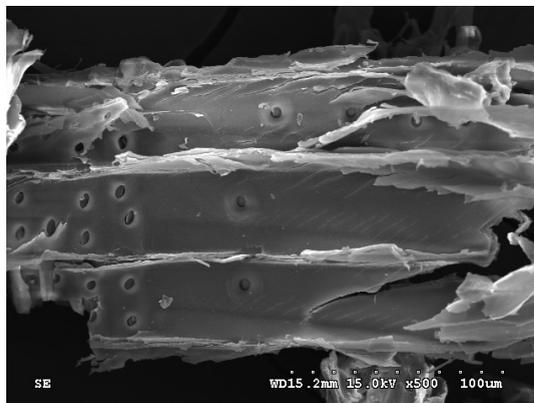


圖3 掃描式電子顯微鏡下木質材料的多孔性 (林柏亨 攝)

的要求越來越高，近年來越來越多的研究關注於開發這方面的技術。木質材料改質技術是一種藉由外力非自發式將木質材料中的性質進行部分質變，但仍保有部分木質材料特性，以提高木質材料的性能，亦或是賦予其作為新功能性材料的技術。目前，除了傳統以化學藥劑灌注於木質材料的防腐技術外，現今主要的木質材料改質技術包括：熱處理、化學改質、生物改質和物理改質等。下文將分別介紹這些技術及其應用。

### 1. 熱處理改質技術

是一種將木質材料置於高溫環境中促進細胞壁纖維素和半纖維素等成分進行降解和重組，從而增強木質材料的穩定性和耐久性。該技術發展100年以上，在美洲及歐洲已商業規模化生產，通常在160至240°C的溫度下進行，這些溫度比傳統的木質材料乾燥溫度更高，但仍低到足以控制熱轉化速率。改質過程避免木質材料自燃，排除周圍微氣氛中的氧氣，以通過在部分真空、蒸汽氛圍、熱油或惰性氣體氛圍（如氮氣）中加熱木質材料來實現。改質過程除了環境因素外，還包括處理溫

度和時間（在加熱和冷卻階段）、起始和終止木質材料含水量，以及開放或封閉系統的使用。熱處理技術可以顯著地改善木質材料的抗腐蝕性和耐候性，同時也可以提高木質材料的硬度和物理性質。此外，熱處理還可以減少木質材料中的水分含量，從而減緩其變形和開裂的趨勢。相關研究指出，以傅立葉轉換紅外光譜可觀察到經熱改質之材料表面官能基之羥基特殊吸收峰隨溫度上升而下降，這也代表材料與水分之不親和性上升，在接觸角的數據也可以同步證實此現象。熱處理木質材料在臺灣亦有相關廠商生產，在木質材料地板、外牆和建材類等應用中廣泛使用（圖4及圖5）。

### 2. 化學改質技術

化學改質技術是將木質材料中的天然成分進行改變，以增加木質材料的性能和可持續性。當前常見的化學改質技術包括乙醇胺法、硬化法、醋酸酐法、甲醛法等。這些技術可以使木質材料中的細胞壁和半纖維素等成分進行交聯反應，從而提高木質材料的強度和硬度，同時也可以增加其抗腐蝕和防火性。

乙酰化木質材料是通過將木質材料與乙酸酐反應製成的。在這個反應中，一些木質細胞壁中的羥基被乙酰基取代。乙酸酐和木質材料之間的反應是一個單一取代反應；也就是說，乙酰基和羥基之間是一對一的置換，沒有進一步的反應或聚合，目前已商業化。乙酰化過程涉及將木質材料浸泡在乙酸酐中，在高溫下進行反應，然後清洗以去除多餘的乙酸酐和乙酸。氣相反應可以使用丁烯酮氣體或乙酸酐蒸氣。乙酰基的永久吸收量取決於反應時間、溫度和起始劑或膨脹劑的存在。乙酰化木質材料的優點包括：尺寸穩



圖4 熱處理桂竹管材後表面顏色褐化 (林柏亨 攝)



圖5 國外木質材料熱處理竹積層柱產品 (林柏亨 攝)

定性：乙酰化的木質材料不像普通的木質材料會隨著環境濕度和溫度的變化而變形或膨脹。抗腐蝕性：乙酰化的木質材料比普通的木質材料更耐腐蝕，能夠延長使用壽命。可加工性：乙酰化木質材料比普通的木質材料更易於加工，因為它的表面硬度和耐磨性增

加。無害性：乙酰化木質材料的製造過程不會釋放有害物質，對環境較友善和人體健康沒有危害。糠醛化改質是透過將木質材料浸泡在糠醛醇 (Furfuryl Alcohol, FA) 中，然後經過熱固化，使FA聚合在木質材料結構中。這種技術能夠增強木質材料的性質，例如提高木質材料的耐久性、抗腐蝕性、耐水性和抗蟲蛀性等。糠醛醇是由木質素中的木糖脫水而成的呋喃類化合物，具有很高的反應性，可以在酸性催化劑的作用下進行聚合反應。糠醛化技術通常需要添加酸性催化劑，來促進FA的聚合反應。完全聚合後的糠醛化木質材料成品是一種硬度較高、顏色較暗的熱固性材料。糠醛化技術的優點包括可提高木質材料的性質和使用壽命、增加木質材料的耐久性和穩定性、減少木質材料吸濕膨脹和縮水現象、提高抗蟲蛀性和耐火性、降低環境對木質材料的影響，以及使用可再生、環保的原料等。這種技術在建築、室內裝飾、家具等領域廣泛應用，並且被認為是一種有潛力的木質材料保護和改質技術。

### 3. 生物改質技術

生物改質技術是將生物源性聚合物和木質材料進行混合，從而增加木質材料的可持續性和強度。這些聚合物包括澱粉、纖維素等。生物改質技術可以使木質材料更加耐用和耐水性，同時也可以提高其抗腐。物理改質技術是一種利用機械、電子、光學等手段對木質材料進行改質的技術。這些技術包括木質材料光照、等離子體處理等。物理改質技術可以提高木質材料的抗彎強度、硬度和耐久性，同時也可以改善木質材料的表面性質和顏色。

以上所述的木質材料改質技術都具有廣泛的應用前景：(1) 熱處理技術，可以應用於木質材料地板、外牆和屋頂等建築領域；(2) 化學改質技術，可以應用於建築、家具和地板等多個領域；(3) 生物改質技術，可以應用於木質材料防腐和木質材料複合等領域；(4) 物理改質技術，可以應用於木質材料的表面處理和改善木質材料的顏色等方面；選擇合適的木質材料改質技術可以使木質材料更加耐用和可持續，有利於保護環境和推動可持續發展。

## 結語

木質材料具有獨特的物理和化學性質，但也容易受到非生物性和生物性的因子影響，如細菌、真菌、白蟻和其他害蟲，進而導致其降解和壽命減短。為了解決這個問題，發展出了木質材料改質技術，以增強木質材料的耐久性和可持續性。目前主要的木質材料改質技術包括熱處理、化學改質、生物改質和物理改質。熱處理技術涉及在控制環境下將木質材料暴露於高溫下，以改善其耐腐蝕和耐候性。化學改質技術使用化學劑來處理木質材料，以增強其強度和硬度。在相關研究報告亦指出，熱處理過程可以使當地和低價值的木質材料物種得到有效利用，減少森林砍伐，而且相關研究指出熱改性步驟的能源消耗和二氧化碳排放相對於乾燥步驟較低，減少全球碳足跡促進低碳經濟。因此選擇適當的改質技術取決於木質材料的預期應用及欲改善的性質。例如，如果木質材料將用於戶外應用，熱處理技術會更適合以提高其耐候性；另一方面，如果木質材料將用於結構應用，則化學改質技術會更適合以增強

其強度和硬度。通過選擇適當的改質技術，木質材料可以變得更加耐用。木質材料改質技術為解決木質材料使用中的挑戰提供了有前途的解決方案。通過改善其物理和化學性質，木質材料使用壽命可以變得更長和用途更廣泛，並延緩木質林產品使用生命週期結束回歸之二氧化碳排放。♻️