

竹材及其纖維之性質及應用潛力

◎國立臺灣大學森林環境暨資源學系·張鈞璋、張豐丞 (fcchang@ntu.edu.tw)

竹材的潛力與先進發展的契機

隨著全球溫室氣體排放過度、人口增長迅速等問題浮現。需要耗費大量能源且廢棄後無法分解的各種人造材料同時也成為環境上的一大負擔。而隨著環保意識的覺醒，許多對於環境友善材料的相關研究有越來越蓬勃的發展。因此，具有低成本、高存量、可再生、低耗能、具固碳效益的生物材料在近年開始受到重視，具有十足的發展潛力。

生物材料如木材等曾是重要材料來源，伴隨人類文明數千年。但隨著全球人口增加，資源迅速消耗殆盡，造成森林面積快速消失，嚴重影響全球環境。然而，使用其他相對較高耗能且高碳排放的材料對環境的衝擊更是劇烈。因此在生物材料合理利用與環境保護之間的平衡為一重要課題。近來工業界開始注重材料的有效利用，並積極尋求其他合適生物材料作為替代，其中竹材是受到高度關注的生物材料之一。竹為多年生之單子葉植物，其纖維之材質與部分力學性質較木材更為優異(Khalil *et al.*, 2012)。竹材生長迅速、可分解、價格低廉且纖維強韌，為臺灣重要天然資源。且臺灣竹林種類多，蓄積量豐富，輪伐期短且收穫較不具爭議，非常適合作為木材的替代材料；在收穫方面，集運也比棉、麻等常見的天然纖維更有效率。

在臺灣竹產業已發展許久，工藝品、民生用品等都已具有許多使用竹材的產品。但隨著時代變遷，竹產業與工藝技術在過去幾十

年逐漸沒落，轉而被大量人造材料取代，國內竹材相關應用也多屬於附加價值較低的產品，使用上也受到侷限。然而在國際間，竹材應用於枕木、結構建材、再生纖維、紙漿、活性碳材、風電葉片、織品乃至飛彈體以及列車車體等都已具有全新的利用思維與技術。臺灣作為過去領先全球的竹材生產與加工地，極具生產竹纖維材料的潛力。若能跟上材料轉型的全球潮流，發展相關技術則能提高在下一個世代的競爭力並為環境盡一份力。

性質優異的竹材

竹為禾本科(*Poaceae*)竹亞科(*Bambusoideae*)多年生單子葉植物的總稱，雖有草本品種，但在臺灣多為喬木型態之木本植物。其全球分布廣泛，生長面積以北起韓國南至斯里蘭卡的亞洲地區佔65 %為最大宗，美洲部分約為28 %，以赤道附近之拉丁美洲為主要產地(Liu *et al.*, 2016)。以臺灣主要經濟竹種為例，其高生長僅需1年即可完成，材質部分則可於3到5年內達到最佳。臺灣常見的經濟竹種有單桿生的桂竹以及孟宗竹，以及叢生的麻竹、長枝竹、綠竹以及刺竹等。在使用原竹或竹桿時以孟宗竹為主要種類，而竹編織則以桂竹及長枝竹較為合適；其他竹種則用於工具類、工藝類以及副產物如竹筍的生產。

竹材的力學性質在過去已有長足研究，其力學性能主要源自於竹纖維在組織中近乎同方向的排列與化學組成特性所致(Wai *et al.*, 1985)。竹材的微觀組織為其性能優異的主要原因之一，微觀尺度下主要由兩種組織

所組成，一是構成竹材絕大部分體積的基質組織(Ground tissue)，由大量薄壁細胞所構成；二是環狀散生於基質組織中的維管束組織 (Vascular bundle)具有高度木質化且堅硬的維管束鞘包圍其外，負責水分運輸；內部則是大而中空的導管負責養分之縱向輸送(如圖 1b)。維管束因其主要由厚壁細胞所構成，是竹材提高性能的重要構造，加上在部分加工方法中可獨立分離，因此亦有部分文獻稱之為竹纖維，並將當中組成木質部之形如針狀且雙邊封閉的單一細胞稱為「單元纖維」(Elementary fiber) (Muhammad *et al.*, 2018)。如圖 1f 所示，單元纖維的細胞壁較木材更多層也更厚，使其密度較高，再加上各細胞壁層內的微纖維傾斜角也不同，因此可以達到強化細胞壁的效果 (Yu *et al.*, 2005)。維管束的分布在高度方面，越靠近頂部、竹桿斷面越

小，其木質化纖維密度越高。橫方向則由內向外密集化，亦即外部較為密集內部較為疏散。內側之纖維含量約15至20%，而外側纖維含量為60至65% (Obataya *et al.*, 2007)。同時內側之維管束斷面較大，外部者較小，因此竹材靠表皮側擁有較佳的力學性能。

強韌的竹纖維

除了前段介紹以維管束組織構成的竹纖維，但實際上竹纖維有隨著應用的場合不同而有許多定義。通常只要材料單元在一定的長寬比(Aспект ratio)下就可以歸屬於纖維材料。或者在複合材料領域中，用以添加進高分子中的竹粉(Powder)、竹片(Chips)或者碎竹片(Flakes)等都可廣義的稱為竹纖維。

竹纖維與其他纖維對比之物性、拉伸性能與化學組成可見表1。表1中可發現竹纖維

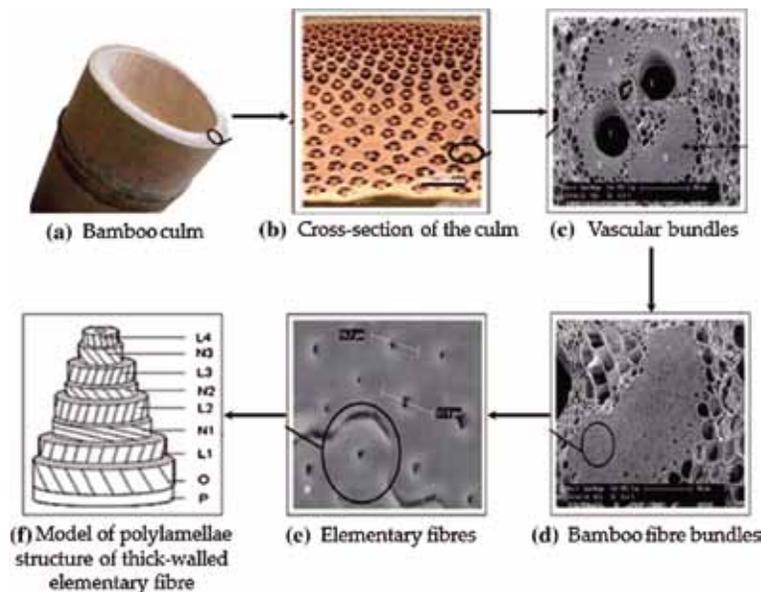


圖1 竹材各級組織之構造(Yu *et al.*, 2005)

表1 各類纖維的化學組成成分與機械性質 (Bledki *et al.*, 1996; Satyanarayana *et al.*, 1990; Bismarck *et al.*, 2005; Ilvessalo-Plaffii 1995; Pilla 2011; Fairov and Bhattacharyya 2007; Mishra *et al.*, 2004; Mwaikambo and Andell 2006)

| 纖維 | 密度(Kg/m ³) | 纖維傾斜角 | 纖維素(%) | 木質素(%) | 拉伸強度(MPa) | 伸長率(%) | 彈性模數(GPa) |
|------|------------------------|-------|--------|--------|-----------|----------|-----------|
| 玻璃纖維 | 2.5 | - | - | - | 2000-3500 | 2.4 | 70 |
| 芳綸纖維 | 1.4 | - | - | - | 3000-3150 | 3.3-3.7 | 63-67 |
| 碳纖維 | 1.7 | - | - | - | 4000 | 1.4-1.8 | 230-240 |
| 蔗渣 | 1.3 | 10-22 | 55.2 | 25.3 | 290 | 3-7 | 17 |
| 竹 | 0.6-0.9 | 2-10 | 45-60 | 15-32 | 140-800 | 1.3 | 11-30 |
| 香蕉 | 1.4 | 11 | 65 | 5 | 500 | 5.9 | 12 |
| 椰殼 | 1.3 | 30-49 | 32-43 | 40-45 | 131-200 | 15-40 | 4-6 |
| 棉 | 1.5 | 33 | 85-90 | 5.7 | 287-800 | 1.2-1.5 | 13-27 |
| 亞麻 | 1.5 | 5-10 | 64-71 | 2 | 345-1100 | 2.7-3.2 | 27.6 |
| 闊葉樹 | 0.8 | - | 44-50 | 20-30 | 90-110 | 11-13 | - |
| 火麻 | 1.5 | 6.2 | 90 | 8 | 310-570 | 1.6 | 30-70 |
| 黃麻 | 1.5 | 8.1 | 63 | 11.7 | 393-1000 | 1.16-2.5 | 13-54 |
| 紅麻 | - | - | 72 | 9 | 930 | 1.6 | 53 |
| 油棕 | 0.7-1.6 | 46 | 65 | 29 | 248 | 25 | 3.2 |
| 鳳梨 | 0.8-1.6 | 8-15 | 81 | 12.7 | 1.44 | 14.5 | 34-82.5 |
| 苧麻 | 1.5 | 7-12 | 68-76 | 0.7 | 560 | 15 | 24.5 |
| 劍麻 | 1.5 | 20.25 | 70 | 12 | 468-640 | 5-14 | 9-22 |
| 針葉樹 | 0.3-0.7 | - | 44-50 | 20-30 | 60-90 | 8-14 | - |

擁有相對低的微纖維傾斜角，也就是微纖維承受拉力的力能和較高的剛性可更完整的發揮，因此在破壞時的伸長率幾乎為所有天然纖維中最低。而拉伸彈性模數以及拉伸強度表面上雖非最佳，但考量僅0.6-0.9 g/cm³的密度，其比強度和比模數可與玻璃纖維相當甚或更高。竹材屬非均質材料，隨著纖維尺寸越大有更高機率存在微觀的缺陷進而造成破壞。因此在尺寸效應的影響下，不同尺寸的竹纖維其性質會不同。此外，纖維束中多支纖維間需要倚靠結合強度相對較差的基質組織來連結，進而使單纖維的拉伸強度會較多支纖維更佳，甚至可達將近2.5倍(Liu *et al.*, 2012)。除此之外，化學成分、取材部位、竹齡、長度、測試方法、竹節、化學處理與竹種等對於測定的性質而言都有許多變異(Verma and Chariar 2012; Rassiah *et al.*, 2014; Perremans *et al.*, 2018)。表2為不同型態的竹纖維性能。

表2 竹纖維的機械性質 (Liu *et al.*, 2012)

| Sample | 強度 (MPa) | 應變(%) | 模數(GPa) |
|--------|----------|-------|---------|
| 纖維束 | 387 | 16.7 | 2.7 |
| 單纖維 | 916 | 12.6 | 13.6 |
| 再生纖維 | 290 | 71.2 | 1.8 |
| 單纖維 | - | - | 13 |
| 奈米纖維 | - | - | 40 |

竹材纖維的獲得與製備

原材料必須經過一些加工程序，方可轉換成方便利用的型態；而纖維製備方式也決定其性能，可分成化學法、物理法與混合法等。化學法利用以鹼性為主的藥品將纖維間的木質素降解進而使之分離；物理法則多以盤磨、破碎等機械力方式或透過高溫蒸氣進行的蒸氣爆碎法(Steam explosion)使纖維分離，而混合法則結合兩者的優勢。

表3 不同製備方法取得之竹纖維機械與物理性質 (Zakikhani *et al.*,2014)

| 製備法 | 拉伸強度(MPa) | 模數(GPa) | 纖維長度(mm) | 直徑(μm) | 密度(g/cm ³) |
|-------|-----------|---------|----------|---------|------------------------|
| 機械類 | | | | | |
| 蒸氣爆碎 | 615-862 | 35.5 | - | 15-210 | - |
| 輥磨 | 270 | 19 | 220 | 100-600 | - |
| 研磨 | 450-800 | 18-30 | | | 1.4 |
| 浸漬 | 503 | 35.91 | | | 0.91 |
| 打碎 | 420 | 38.2 | | 262 | - |
| 化學類 | | | | | |
| 化學處理法 | 450 | 18 | 10 | 270 | 0.89 |
| 鹼處理 | 419 | 30 | | 230 | - |
| 混合類 | | | | | |
| 壓縮加化學 | 645-1000 | - | >10 | 400 | 0.8 |
| 盤磨加化學 | 370-480 | - | 120-170 | 50-100 | 0.9 |

化學方法中鹼性藥液可能會使部分的結構成分如半纖維素也隨著木質素降解，使其性能降低。而機械法中可能因為細胞壁的拉扯破壞使承受外力的能力大幅下降。不同取纖方式如表3中所述。例如輥磨法(Rolling mill)所得的纖維擁有最低的拉伸強度而蒸氣爆碎法則有較高的拉伸強度與彈性模數。然實際上需考量後端使用需求才能決定要如何取得纖維，以在成本、能源、性質及型態上取得平衡。

竹纖維的應用與未來

結合上述竹纖維的特性，可發現其天生即具備當作高性能材料的潛力。臺灣社會對於農林產物的既定觀念深深阻礙了竹材料的發展。過往常認為竹材只適合作為農具、家具、竹編竹蓆等傳統民生用品，或者無工程用途可言的工藝材料。但在科學發展飛速的今天，對天然材料的認識與處理技術已不可同日而語，對耐燃、防蟲、防腐等各種性能之提昇都已有相應的技術可以達到。

竹材本身常包含缺點如竹節、變異性等影響竹材品質。但將原竹拆散成為纖維可以分散其原生缺點，進一步均質化。再透過特定配向的排列與重組，可使原本具有方向性的性能發揮得更好也可以減少其缺點，達成

更多元的利用。圖2為本團隊所研發，以真空樹脂轉注編織預成形竹複合材料，在機械性能、尺寸安定性均有優良的表現。纖維型態乃未來備受關注的形式，包含複合材料、運輸產業、生醫工程、國防工業乃至民生工業都已可以見到初步的成果。

推廣並促進竹纖維現代化工業的對於臺灣社會有極大的好處，例如降低工業污染、減少能源需求、提高安全性也可以促進相關工業綠色轉型。而國內以下終端帶動上游的整體產業發展也可以提升山村經濟活動，降低進口依賴，並可間接帶動一級產業高值化。在全球觀點，也可以透過循環與固碳的材料特性，為下一代提供更永續的生活環境。♻️



圖2 高性能編織竹複合材料