

天然纖維編織與其複合材料

◎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)

生物纖維與複合材料

生物纖維的編織自數千年前就已經出現在人類文明中，時至今日仍是工藝、民生器物與藝術等領域的重要技術。生物纖維可分為動物性及植物性，動物性雖有如蠶絲、皮質與動物毛髮等種類，但目前仍以植物纖維如棉、麻、棕櫚葉、藤、竹...等為主(Fuqua *et al.*, 2012)。除此之外，低廉的價格與可再生的特性儼然成為學界與產業界近10年來高度關注的材料。

生物纖維由於其密度低、強度高，因此製成纖維加固型樹脂複合材料(fiber reinforced polymer composite, FRP Composite)時可以在大幅提升強度與剛性的同時，維持較低的密度。除此之外，生物纖維多半是植物細胞的集合體，其中的空腔與間隙可以為材料帶來絕佳的隔熱性能。在面對外來能量(如振動)時也得益於其多孔性，使能量快速消散。植物纖維的全部製程幾乎都可以在攝氏100度內完成，相比於常見的玻璃纖維或碳纖維動輒上千的溫度，可以說是非常具有加工優勢。在生產上，透過現代的撫育技術，已可以確實達到永續生產。意即並不會面臨如石化原料般枯竭的風險。在現代科技的輔助下，對於材料的分解與耐候已有十足的掌控。也就是在經歷當初設計的生命週期後，可以自然分解，不會造成廢棄物累積。分解所排放的碳最多也是最初生長時從大氣中捕捉的碳，藉此達到碳中和。

雖然生物纖維用於FRP的研究已非常豐富，產業上的應用也逐見嶄露頭角。如歐洲

高檔車款、航空座椅、運動用品以及安全帽等民生用品都已有生物纖維FRP的應用實例。但多半仍侷限在短纖維、非連續纖維的應用型態，將纖維編織再製成FRP則相對較少。又因為單元尺寸、加工方式與領域隔閡等因素，使得植物纖維領域中，相關理論相對稀少。因此本文將以此為出發點，透過纖維編織工藝的介紹以及整理編織FRP的重要因子，推廣生物纖維FRP的普及。

生物纖維的編織

雖然短纖維的FRP雖有加工便利、製造快速的優點。但就力學性能的表現而言，無法與連續纖維的FRP相比。連續纖維可以提供更完整的基質—纖維界面，減少應力集中，也可以藉由良好的應力傳遞使衝擊、疲勞等性能進一步得到改善。與人造纖維類似的是，生物纖維多半需要經過抽纖(extraction)、乾燥、纏繞、編織等層層構築的方式來達到纖維的連續。事實上，植物纖維天生就非常適合用於編織。這可以歸因於它的天然特性：細長比高(aspect ratio)、韌性強(toughness)、取得容易、製作門檻低與纖維間摩擦力大而易於成形，因此在人類文明中已發展的相當成熟與普及。若以現代材料工程的角度言之，許多植物纖維擁有極高的軸向拉伸強度(axial tensile strength)與優秀的扭轉模數(torsional modulus)，但密度卻非常低(Arrakhiz *et al.*, 2013)，實屬潛力十足的材料。

植物纖維作為編織材料已十分普遍，但編織後當作FRP的預成形體卻仍較為受限。過去

十年雖然業界中使用植物編織纖維的比例很低，但學界已有許多的研究。以下整理常被用來當作編織FRP的纖維種類。首先可依提取纖維的部位分類，如植物內皮(bast)。其中最廣泛應用的有亞麻(flax, *Linum usitatissimum*)、火麻(hemp, *Cannabis sativa*)、黃麻屬植物(jute, *Corchorus spp.*)、槿麻(kenaf, *Hibiscus cannabinus*)與苧麻(ramie, *Boehmeria nivea*)等；取自葉部纖維的種類有劍麻(sisal, *Agave sisalana*)、馬尼拉麻蕉(abaca, *Musa textilis*)、紐西蘭麻(New Zealand flax, *Phormium tenax*)、鳳梨(pineapple, *Ananas comosus*)、芭蕉屬植物(banana, *Musa spp.*)與椰棗(date palm, *Phoenix dactylifera*)；取自植物種子或果實的纖維種類如棉(cotton, *Gossypium herbaceum*)與油棕(oil palm, *Elaeis guineensis*)。其他如稻桿與竹材也是常見的編織材料(Fuqua *et al.*, 2012)。

編織複合材料與一般FRP相同，都是將高強度、高模數的纖維與延展性佳、流動性佳的高分子樹脂混合製成新的材料。而編織複合材料則是將纖維預先成型的一種型態，透過預成型可以使加工速度提升、纖維的運輸方便以及提升特定性能等優點。然而編織的型態與種類則會隨目的與纖維的種類有所不同，並且影響著FRP成品性能和成型方式(Wambua and Anandjiwala, 2011)。因此欲掌握編織FRP的特性就必須先從編織的分類與種類說起。

編織工藝的分類

編織(textile)乃廣泛指稱將細長的物體透過特殊工法將其組合成一個面積或體積更大的量體，而藉由纖維間彼此組合的方式不同

可以分為梭織(weaving)、針織(knitting)、帶織(braiding)與拚織(stitching)。其中梭織因其技術難度較低、編織結構簡單與利於模擬，為目前實務上最廣為應用在玻璃纖維、碳纖維FRP的種類(Wambua and Anandjiwala, 2011)。在編織中最基本的單位是單纖維(single fiber)，藉由漿紗(sizing)或紡紗(spining)將單纖維組成更粗更為強韌的纖維束(fiber bundle)。纖維束又可依據其中的單纖維是否扭曲而分成全部平行排列的帶束(fiber tow)與扭曲纏繞而成的紗束(yarn)。形成纖維束後即可經由前述4種主要方法，將纖維從一維的單元組合成二維及三維的預成形體，又稱纖維布(fabric)或纖維胚(fiber mat)。編織結構探討的範疇即為上述各單元間的組合、排列與幾何樣態等。

梭織作為最主要的編織工藝，其衍伸的類型有非常多種。如平面編織中最簡單的織法為平紋編法(plain weave)、斜紋編法(twill weave)以及緞紋編法(satin weave)，三者並列為基礎編法(fundamental weaves)。每種編法都有各自的特色，平編法為簡單但也是最為多樣化的編法。斜紋編法通常有更好的懸垂度，也可以使編織平面間的空隙最小化，提供穩定度高、性能好的預成形體。緞紋雖較為複雜，但較稀疏且錯開的疊合位置可以創造出更為平整光滑的織品表面。嚴格來說緞紋編法中每組經軸纖維只與緯軸纖維重疊一次，且交疊區域彼此不相鄰，因此可以在同樣纖維數量的情況下使預成形體有最好的柔軟度(Long, 2005)。

從上文可以發現，要將纖維組成預成形體必須經過纖維束彼此交錯穿插(interlaced)的過程，經向與緯向纖維交叉區域的現象稱為疊壓(crimp)。然而經過疊壓後，由於纖維之

於受力軸的波動(undulation)與離軸偏移(off-axis deviation)，使得成形後的FRP部分性能較原本的纖維更低。尤其在異方性顯著的生物纖維有更明顯的衰減(Corbin *et al.*, 2020)。因此其他的編織型態也被開發出來解決各種性能缺陷，例如經向加強(warp rib)(圖1a)與籃紋編法(basket weave)(圖1b)等平紋編法的加強型，透過加強特定方向經緯纖維數來使的預成形體更具有可撓性並減少疊壓造成的性能損失。其他諸如改良自斜紋編的人形紋編法(herringbone weave)(圖1e)與混合各類型的縐型編法(crepe weave)(圖1f)。

帶織也是目前可以高度自動化的編法，主要的型態如圖2所示。其形成最少由三組獨立的纖維束構成，並以對角線纏繞的方式彼此牽制最後製成連續的平面狀或管狀的預成形體。藉由加工時的設定，可以使每束的曲率、間距長度、孔隙形狀與纖維的連續性進

行設計，而此編法最大的優勢就是可以輕易製成幾何形狀多元的預成形體，不似梭織法主要局限於平面或方體。與梭織一樣，帶織也有各種衍身型如雙軸帶織(biaxial braid)、垂直帶織(vertical braid)與水平帶織(horizontal braid)(Peters, 2013)。

針織在生物纖維的利用上扮演舉足輕重的角色，成衣與民生器具時常可以見到其利用，最常使用的如麻類纖維、蛋白性絲質如蠶絲等。但目前以結構使用為目的FRP則相對較少，是由於針織的預成形體易於變形，且成形後的穩定度不高。此外要以針織形成緊密且平面的預成型體的難度較高。針織最重要的特色，就是纖維間並未彼此疊壓。取而代之的是透過「穿針引線」的方式，將纖維束穿插進另一束所形成的空間並不斷重複而成型。下圖3為其中一種針織的方式。

前述為各種編法的二維型態，但隨著

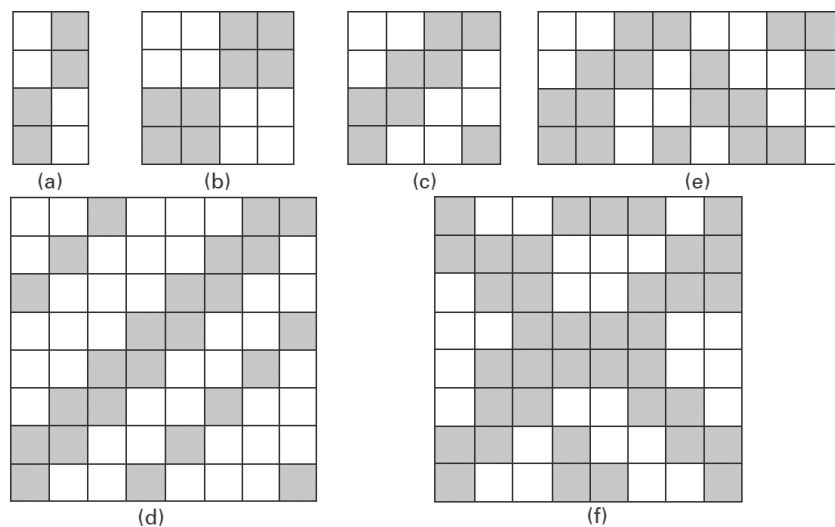


圖1 各類衍身編法 (a) 經向加強型2/2; (b) 籃紋編; (c) 斜紋2/2; (d) 斜紋 2/3/1/2; (e) 人形編; (f) 縐型編(縐紋8/3混合斜紋2/2)(Long, 2005)

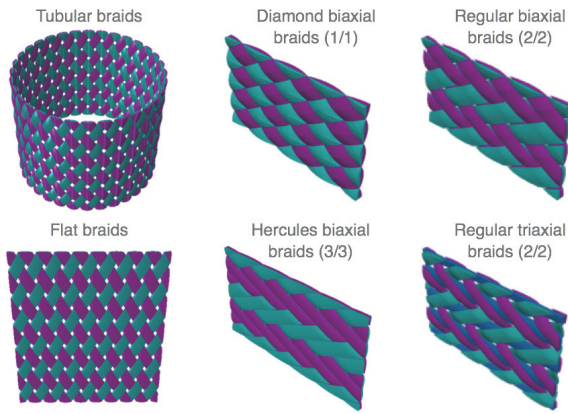


圖2 帶織法的不同型態(Xu *et al.*, 2012)

加工技術進步與結構體對性能的更高需求，各種編法也均有針對加強厚度方向所設計的三維編織，包含夾層式預成形體(sandwich preform)、固態預成形(solid preform)、雙軸三維編織(biaxial 3D preform)乃至多軸編織(multiaxial stereoscopic textile)。

編織複合材料的特性與重要考量

隨著植物種類的變化，纖維間的特性諸如長度、粗糙度、韌性與密度等都有明顯的差別，因此將其加工成預成形體的方式以及FRP成形後的性能也會有所不同。除此之外，由於編織是相對複雜的「結構」，因此對於FRP成品的影響方式也就更為多元。

首先是構成編織系統最基本的單元，單纖維。植物纖維隨著種類有極大的差異，這些差異包含細胞腔大小、細胞排列、細胞壁厚度與化學成分。由這些微觀組織可以透過兩種形式組成一維的纖維束。第一種是纖維在與植物體分離時就維持的天然連結，例如竹編使用的竹篾。第二種是將分離後的纖

維透過扭轉的方式纏繞成一個更粗更長的單元。前者的影響因子包含竹篾的厚度、寬度、竹節、含水率與取材的部位。以竹篾為例，越靠近表皮性能越佳。厚度越大則編織後柔軟度不佳、也會有明顯的尺寸效應。後者則會受到扭轉的密度、扭轉的稔數、扭轉時的張力以及最後的線密度有明顯的影響。通常單位長度上扭轉次數越多，纖維偏離受力軸角度越大，因此拉伸性能可能會下降。但單位長度內若是纖維越緊密則整體的拉伸性能也會越好(Alías *et al.*, 2018)。無論是單纖維或是纖維束都還有一個重要的特性需要考慮，就是表面的粗糙度。不同於人造纖維多半需要高分子黏著劑來合成，天然纖維在解織過程中所產生粗糙表面就可以提供良好的摩擦力。植物纖維製成的纖維束以經過纏繞成網的紗束為主，而纏繞的方式與纏繞後的狀態會顯著的影響成品性質。

經過編織的平面預成形體主要可依照纖維的排列方式與交疊方式來決定其性質。排列有關的則如纖維束間的距離、平面上的孔隙、面積重、每單位邊長上的束密度及每束的斷面形狀等。通常而言平面上的纖維總量

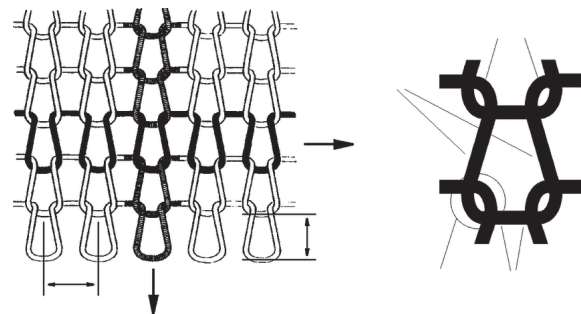


圖3 針織編法的示意圖(Reber *et al.*, 1999)

越多，密度越高而抗彎的剛性會越好，但拉伸性質則不一定。纖維束間之交疊方式即是主要的原因，編織是透過纖維的彼此摩擦而成形，因此必定會牽涉到纖維彼此疊壓的過程。疊壓會使的纖維形成一種波動的彎曲狀態。因此疊壓的密度、疊壓面積、波動造成的纖維視長度縮短都會受到前面提過的編織方式而異。此外，由於纖維之間的空隙會被樹脂填滿，因此編織空隙的大小與排列也會影響成品的製程和性能。上述的這些因子都會對預成形體產生影響，最重要的四類性能如下：面內拉伸、面內剪力、面外彎曲以及壓實效應。前兩者主要與FRP成品的受力與變形有關，面外彎曲除了與FRP彎曲性能有關，也會影響複雜FRP工件的製作難度與品質。抗彎越佳者就越難製成多元的成品。最後一種壓實的效應主要影響的是製程中的特性。一般而言，預成形體多半有孔隙，且在受到垂直壓力時會被模具系統「壓扁」。而壓扁的過程包含孔隙被壓縮以及纖維束自身的受壓。因此影響的不只有成品厚度，還有纖維與基質的體積比。總結上述，纖維的編織若以現代複合材料工程的思維來看，是個因子複雜的領域。而且影響並不侷限於纖維間而已，也會與基質產生交互作用而影響FRP品製。然而這樣多因子的特性也同樣是個優點。透過許多因子的精準設計與調控，可以製作更可控、更多元、更彈性且更符合應用場景的FRP。

臺灣發展生物纖維編織FRP的未來

綜合而言，生物纖維適合編織的特性與其優異的性能，在可預見的未來內定會隨著當今的趨勢而有高度的發展。環保、輕量

化、低耗能、可再生等特性也都會使其備受關注。臺灣位處亞洲樞紐，擁有高度發展的製造能力。無論研發水準或是基礎建設都相當充足，尤其複合材料、樹脂以及紡織工藝等相關領域都在全球扮演領頭羊的角色。亞洲的天然纖維在存量、種類、生產技術上擁有先天優勢。後天優勢上也在風電、汽車、遊艇、航空、國防等下游產業崛起的同時占盡發展契機。目前天然纖維編織主要的困境可分為兩類，在學理方面除了科學化的性能分析非常複雜外，理論的推廣性與適用性也尚顯不足。在產業面則受到製程難以完全自動化、生物材料的變異性以及跨物種間生產模式的隔閡所阻礙。隨之而來的是生產成本過高、性能尚無法取代人造纖維的問題。因此積極的展開更多基礎研究、量化分析與工程思維的應用已是必要的作為。

現今紡織業已與複合材料發展有著密切依存關係，複合材料與天然纖維的發展也已是現在進行式，若能在高性能綠色材料與低碳排轉型等方面提前布局，應可大幅度提升臺灣放眼全球的競爭力。此應由農林單位、學界與工業界共同努力，期望透過材料的轉型帶動產業綠色革命、低碳生產以及一級產業高值化，進一步使我們居住的地球有更好的未來。☀