

木材燃燒面面觀

◎林業試驗所森林利用組·黃清吟

前言

一提到木材燃燒，馬上讓人聯想到火災。它可能造成生命與財產損失，以及對環境的危害，常教人談虎色變。其實木材或生質材料的燃燒，是人類最早使用的能源形態，它在人類文明的演進上有著舉足輕重的地位，也是諸多科技和工藝發展的奠基石。如同水可載舟亦可覆舟，木材和其他生質材料的燃燒可以是建設性的，也可以是破壞性的，在此節能減碳的時代，木材的燃燒可以負面地增加碳排放，也可以正面地提供再生性能源，就看人們如何善用知識來巧妙應用了。

燃燒的要件

所謂燃燒是指物質在空氣中或氧氣中因快速氧化作用而產生熱與光的現象，燃燒的發生包含三個缺一不可的要素：氧氣、熱源和燃料，此三要素即構成火三角(fire triangle) (圖1)；除三要素外，燃燒的延續和擴展還需一連串的連鎖反應來維繫。以高分子為例，它的燃燒過程是由交互作用的物理和化學反應所組成，它的影響因素十分複雜，可由宏觀與微觀燃燒機構來了解。一般言之，高分子受外部熱源加熱，溫度逐漸上升，至裂解(pyrolysis)溫度後產生可燃性氣體、不可

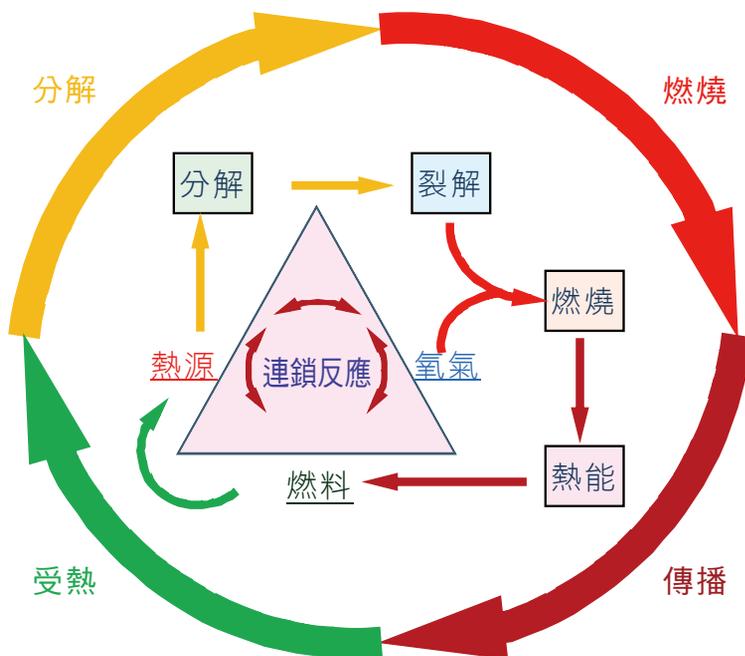


圖1. 火三角及燃燒過程

燃性氣體及固體殘渣，當可燃性氣體達到燃點並與氧氣混合，便發生燃燒反應釋放光和熱。燃燒所釋出的熱量又回饋到高分子使燃燒持續進行，直至氧氣、熱源或燃料三要素中的任一要素耗竭使連鎖反應中斷為止。因此宏觀上燃燒是包含受熱(heating)、分解(decomposition)、燃燒(combustion)及傳播(propagation)四個階段，而高分子一定是在凝態(condensed phase，指固體和液體)下，表面受熱發生無氧狀態的裂解，其熱分解產物在氣相時發生有氧狀態的燃燒。由微觀的觀點來看，高分子的燃燒是由氫自由基H·與氫氧自由基OH·所引發的自由基連鎖反應。經過這些反應後，高分子的碳鏈逐漸縮短，進一步轉為甲醛、一氧化碳和氫氣等，最後更燃燒生成二氧化碳與水蒸汽。

木材的燃燒

木材是由纖維素、半纖維素和木質素組成的天然高分子化合物，它的燃燒也依循高分子化合物的燃燒過程，但由於木材的異質性使它的燃燒特性較一般均質性的高分子化合物更為複雜。其實木材是無法直接燃燒的，它是在加熱後的裂解過程中，先產生揮發性氣體，在適當情況下方可引燃。若燃燒熱足以維持裂解反應進行，則燃燒可持續直到木材燒至灰燼為止。一般言之，木材受熱後開始升溫，當溫度高於100~200°C間，內部所含水分開始以水蒸汽形態逸出，另外還產生其他不燃性的氣體和液體如CO₂，甲酸及醋酸等。其後它的主成份及副成份因熱性質不同陸續交互影響發生一連串的脫水、氧化、分解及解聚等熱裂解反應，產生種類繁多的

中間產物，最後轉化成固體殘渣、不燃性氣體及揮發性氣體與焦油。在氧氣供應充足的情況下，固體殘渣與氧作用產生無焰燃燒(glow)生成焦炭，揮發性可燃物質則與氧作用行有焰燃燒(flame combustion)，二者產生的光和熱可再回饋至木材表面，使熱解和燃燒周而復始的持續進行，而不燃性氣體釋出後則冷卻成煙。木材熱裂解反應與溫度、壓力和加熱速率有關，可由反應動力學、熱分解途徑及生成物的數量與性質等研究來瞭解。木材的裂解以碳-氧鍵(C-O bond)的斷裂為主，在650°C以下碳-碳鍵(C-C bond)的斷裂極為不易。木材的裂解是三主成份裂解的綜合表現，其中以半纖維素最易受熱反應，纖維素次之，木質素則最不易反應，分述如下：

木材主成份的裂解

1. 纖維素

纖維素熱裂解過程中，因為碳-氧鍵的斷裂而引發兩個相互競爭的反應。第一個反應是在較低溫度時(< 300°C)纖維素分子內環狀的葡萄糖單體內分子鏈斷裂，發生分子內脫水反應(intramolecular dehydration)生成脫水纖維素(anhydrocellulose)，之後產生CO、CO₂、CH₄、H₂O、其他揮發性氣體，以及焦炭。第二個反應是在較高溫度時(> 300°C)纖維素因為解聚(depolymerization)而發生轉醣作用(transglycosylation)以及左旋葡萄糖生成反應(levoglucosan formation)，即纖維素中任意位置的醣苷鍵(glycosidic linkage)發生斷裂產生葡萄糖，其後葡萄糖脫水生成左旋葡萄糖，再繼續脫水、去羧、交聯反應等裂解作

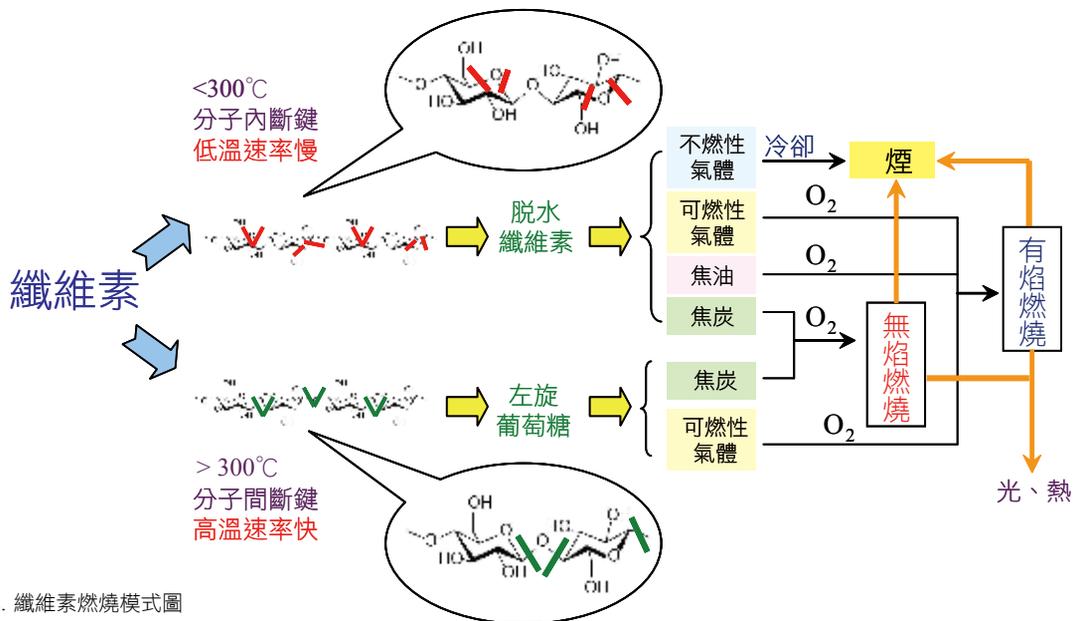


圖2. 纖維素燃燒模式圖

用產生包含CO，CO₂等氣體的氣體部分、包含揮發性的醋酸、甲醇和焦油部分以及固體的焦炭部分(圖2)。在加熱速率極緩時傾向於不規律的解聚反應，使焦炭的產量最大化，加熱速率極快則傾向產生氣體、揮發性物質及灰燼，而無焦炭產生。一般木材的熱裂解介於此二極端之間。

2. 半纖維素

半纖維素與纖維素均屬多醣類，其裂解產物不論來源均甚相似。但與纖維素相較，半纖維素的熱穩定性較差，其裂解後所產生的不燃性氣體較多，焦油較少。闊葉樹的半纖維素含聚木醣(xylan)較多，葡萄甘露聚醣(glucomannan)較少；針葉樹的半纖維素則含聚木醣較少，半乳葡萄甘露聚醣(galactoglucomannan)較多。由於半纖維素屬高分枝的鏈狀結構，具有非結晶性的特質，

使其易於水解產成組成醣，也因此影響了轉醣作用，使半纖維素裂解產生左旋葡萄糖的量不如纖維素多。雖然纖維素及半纖維素裂解過程中均產生水和酸類，但木材熱裂解所生成的醋酸大多來自半纖維素。其中聚木醣因屬較易水解及脫水反應的五碳醣，熱安定較差。纖維素的降解溫度介於200~260℃。

3. 木質素

木質素是非結晶性的高分子化合物，它的基本構造是苯基丙烷(C₆-C₃ phenyl propane)。大部份針葉樹木質素是單獨以guaiacyl propane (鄰甲氧酚基丙烷)為基礎的高分子，而闊葉樹的木質素則為以guaiacyl propane及syringyl propane (鄰雙甲氧酚基丙烷)所構成的高分子。木質素裂解時，由於醚鍵(-O-)與碳-碳鍵(C-C)的斷裂生成酚類(phenol)，而有較多的焦炭產生。以質譜技術

研究木質素裂解得知，在200°C的脫水反應為木質素降解的主要原因。在150~300°C間木質素內的 α -及 β -aryl-alkyl-ether linkage開裂，到300°C左右直鏈狀的側鏈由芳香環的主鏈中脫離，最後在370~400°C左右木質素構成單體間的碳—碳鍵斷裂。木質素的裂解為放熱反應，它的放熱峰發生在225~450°C間。國外以熱重分析—傅立葉紅外光譜—質譜儀聯用技術研究黃楊木質素的熱解，顯示有單甲氧基酚類化合物如guaiacol、4-methylguaiacol等及雙甲氧基酚類化合物如syringol、4-methylsyringol等的出現。

三主成份的熱重分析比較，以木質素的裂解速率較 α -纖維素及全纖維素(纖維素及半纖維素)慢，但發生的溫度較全纖維素稍低。而木質素出現使得固體殘渣量增加。至於木材整體的裂解特性則為其主成份交互影響所致。木材的加熱裂解反應在200~260°C、260~310°C及310~400°C三區間分別為半纖維素、纖維素及木質素的熱分解過程。整體而言木材的熱重損失型態與全纖維素最為接近，與木質素則差異較大，主要因為木材中 α -纖維素及全纖維素分別佔有約50%及75%之故。

影響木材燃燒的因素

由於燃燒本身為複雜的物理和化學反應過程，加上木材的異質性使它的反應機制和中間產物至今仍無法完全明瞭，相形之下，全盤探討影響木材燃燒的因素就相當困難。有關燃燒模式的分析可分為宏觀及微觀模式。由於燃燒是由氧氣、熱源和燃料的連鎖反應所維繫，故此四因素交互參與共同影響燃燒。

在氧氣方面，由於燃燒是燃料與氧分

子間的高能分子碰撞，若燃燒物周圍氧氣濃度夠高且單位時間的供應速率夠快，使其在焦炭表面的擴散率夠大，則可引燃物質、升高火焰溫度、增加燃燒速率而使燃燒擴展。在熱分析中，若使用氣體中氫氣成份增加則其吸熱峰及放熱峰向較高溫移動，氧氣成份增加則反之。在熱源方面，加熱介質(heating medium)、加熱溫度、加熱時間、加熱條件及加熱方式等均影響熱分解及燃燒的結果；而導火(pilot flame)有無則影響引燃單位表面積所需的熱。一般言之，揮發成份含量隨加熱速率加快而增加，而焦炭則隨加熱速率加快而減少。

在連鎖反應方面，為H·與OH·氫氧自由基的作用，且涉及反應路徑及反應速率等屬微觀的熱動力學及化學動力學等範疇。本文僅就分別由木材(燃料)的化學、熱性質及物理性質與燃燒環境等宏觀面相來探討，並歸納於圖3。

1. 燃料的化學性質

化學組成是影響木材燃燒性最直接和重要的因素。一般而言氫含量越高就越易燃燒，氮含量越高就越不易燃燒。元素分析結果得知：針、闊葉樹的碳含量分別為50~53%及47~50%，主要因為木質素及抽出物含量不同。而氫平均含量為6%，氧含量介於40~44%，硫為0.1%，氮則在0.1~0.2%之間。

分子結構也是另一影響因子。木材中纖維素的分子結構較剛性、規整、結晶度高，相較於半纖維素，其熱穩定性較佳、熱裂解速率小且燃燒性低。而木質素含芳香環使其熱穩定性較高、耐燃性佳、易形成焦炭且高溫下裂解釋出的可燃氣體較少。

木材的高位熱值(Higher Heating Value，

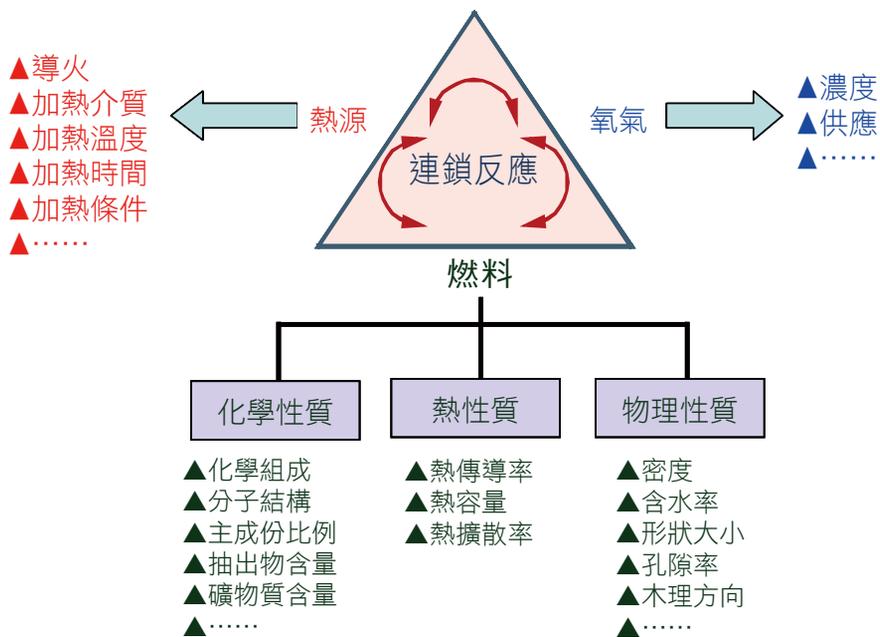


圖3. 影響木材燃燒之宏觀因素

HHV，為不含水蒸汽潛熱的熱值)，於樹種間的變化在15%之內。由於木材中三主成份的高位HHV不同，因此三主成份之比例影響其燃燒性。纖維素及半纖維素的HHV約為4,440cal/g，而木質素的HHV約為5560~6110cal/g。因此木質素含量愈高HHV愈高。

抽出物是存在木材細胞腔中可由溶劑萃取而得、分子量較小的特殊成份，約佔木材重量的1~5%。它的種類相當多，成份與含量則與樹種有關，含量雖少卻大大影響木材的燃燒性質。研究顯示木材的HHV與其木質素與抽出物含量間呈線性正相關；而針葉樹HHV較闊葉樹稍高，一般也歸因於它較高的木質素和抽出物含量。學者指出在眾多抽出物類別中，以松脂及萜類對木材燃燒的影響最大。

礦物質的種類和含量也影響木材燃燒。木材中礦物質以鈣鹽、鉀鹽及鎂鹽為主，含

量約為0.1~0.6%，不同樹種間和同一樹種內礦物質含量會隨土壤狀況及生長速率而異，而熱帶闊葉樹種則有較高的矽含量。木材燃燒後所產生的灰燼是礦物質燃燒後的產物。礦物離子氧化揮發或生成微粒，由於焦炭表面溫度較氣體及微粒內部高，使灰燼在堆積在焦炭表面。

此外，還有其他因素如個別成份的分離方法以及有無酸性催化劑的存在等等，也都影響木材的裂解，本文不再贅述。

2. 燃料的熱性質

影響木材燃燒的重要熱性質包括木材熱傳導率、熱容量及熱擴散率，而木材熱性質又受物理性質交互影響而發生變化。

熱傳導率簡單的說就是物質導熱難易度的指標。木材的熱傳導率遠較金屬為小，約

為鋁的1/1500，不鏽鋼的1/30。它的影響因素極多，舉凡密度、含水率、抽出物含量、木理方向、不規則紋理(如表面裂或節)、纖維角及溫度梯度等都影響木材熱傳導率。含水率25%以下，木材熱傳導率與含水率及比重成線性相關，也隨抽出物含量和溫度的增加而提升。在室溫下，木材熱傳導率以溫度每增加1°C而增加0.2%，因此每升溫50 K則熱傳導率增加10%。木理方向不同，熱傳導率亦異，縱向約為橫向的1.5~2.8倍。

熱容量的定義為已知質量物質增加一單位溫度所需之能量，為物質的比熱乘以質量。比熱因溫度及含水率而異，但不受密度或樹種影響，因此含水率較高的木材熱容量較大。木材含水率在纖維飽和點以下，其熱容量是絕乾材熱容量加上水的熱容量，以及木材與水分間結合力之校正值。

熱擴散率指物質自環境吸熱的速度，是熱傳導率除以密度與熱容量的乘積。因此影響熱傳導率與熱容量的因素都影響熱傳導率。由於木材的熱傳導率很低，密度及熱容量中等，因此木材的熱擴散率遠小於其他建材如金屬、磚、石等。

3. 燃料的物理性質和燃燒環境

引燃物的效能和燃料接受引燃能量的能力關係密切。木材能被引燃的靈敏度受含水率、密度、形狀大小及孔隙率等物理性質影響。

在所有物質理性質中，木材含水率是決定引燃的先決條件。含水率在是在某個限度(40%)以上就不易引燃，因為導火的熱能完全用來蒸發水分。木材尺寸增大，所需要的熱傳或質傳時間就增加，而大型角材燃燒後

在材面堆積的焦碳層，可形成隔熱層阻絕未炭化木材與氧氣接觸，使燃燒中斷。另一方面，燃料和氧分子接觸的表面積則決定燃燒的反應速率，形狀不規則或者材面突起則較易引燃；氧氣是藉著擴散作用滲入物質內部孔洞，若其直徑夠大就可藉著對流來傳導熱能，因此木材孔隙率愈高，除了可以快速引燃，完全燒盡率也較高。木材的密度和孔隙率有很大關係，它也影響木材的熱性質進而影響燃燒性質。

木材燃燒也受使用時的外在因素影響。外在因素包括燃燒時的空氣、壓力、溫度、通風和濕度等環境狀況，木材製品所使用的樹脂、塗料、染料與添加物等加工藥劑，以及作為建材時建築的結構設計、火載量(fire load)以及區劃(partition)情形等。

結語

有了正確的木材燃燒知識就可以減低它所造成的危害，例如以破壞火三角來阻斷燃燒，或改變反應路徑來減少有害物質排放等來達到預防和補救目的；另一方面，也可利用木材燃燒的特性來開發新穎產品如木陶瓷等。最重要的是和其他燃料相比較，木材的氫含量較多，燃燒中產生的揮發性物質也較多，加上它碳中性(carbon neutral)和可再生性的特質，使它成為環保的燃料來源。木質廢棄物或製漿廢液可在控制氧氣的情況進行部分燃燒，所生成的氫氣和一氧化碳可取代部分石化燃料，這種汽化(gasification)技術將是未來重要的發展趨勢。總而言之，在善用、節用和永續利用全球資源的目標中，木質材料的燃燒佔有一席之地。♻️

◎ 參考文獻請逕洽作者