

## 資源再利用技術

# 美國廢輪胎回收利用方案—輪胎衍生 燃料

龔俊豪\*

## 摘要

廢輪胎是一種比煤炭具有更高熱值及經濟價值的燃料。美國每年消耗 2 億 4 千 2 百萬個輪胎，以每個 20 磅的輪胎，每磅產生 15,000 Btu，所以有人估計其代表的總熱值為 7 兆 Btu，這相當是一千二百萬桶的原油或是 0.09% 的美國所需能量。如此高的熱值是其他燃料（石油，煤炭，木材）所不能媲美的。大多數的工廠使用廢輪胎當成燃料必須先切成碎片才能利用，這就是所稱的輪胎衍生燃料(TDF)。此篇文章將針對用 TDF 或整個輪胎來當主要燃料（用於發電廠）或輔助燃料（用於水泥窯，紙業生產）的優缺點比較，生產流程詳述，空氣污染問題來做探討。

### 【關鍵字】

1. 輪胎衍生燃料(Tire-Derived-Fuel, TDF)
2. 廢輪胎回收(Waste/scrap tire recycling)
3. 輔助/替代燃料(Supplementary fuel)
4. 再利用(reuse)

---

\*環基工程顧問公司規劃工程師

## 一、前　　言

就美國而言，在二億四千二佰萬的廢輪胎中不到 7% 被回收，7% 被用來當成燃料，5% 出口至其他國家。其他 78% 的廢輪胎仍被送去掩埋、任意堆置或不合法的丟棄<sup>(1)</sup>。除了掩埋、再利用 (Reuse)、再翻製(Retreat)，或是製成舖路瀝青的替代品、日用品，甚至發電都是其用途<sup>(2)(3)</sup>。一個保守的估計，若是廢輪胎開始被回收利用，將可減少一億五千萬的廢輪胎<sup>(4)</sup>。本文目的主要是提出美國對廢輪胎再利用的實際經驗，以供台灣目前日益嚴重的廢棄物問題提供一原則性的建議，及日後處理廢輪胎之參考。

## 二、廢輪胎在美國的主要用途

美國在廢輪胎處理的實際運用有以下項目，如表 1 所示：

1. 再使用：整個的廢輪胎的再使用通常運用於防波堤、碼頭防撞物、圍籬、兒童遊樂器材、人造暗礁。
2. 再製胎：過去有廠商用 10% 或更多的再製橡膠來翻新胎面，曾經興盛一時<sup>(5)</sup>。但由於科技工業的發達使得新輪胎的價格降低而且品質更好，於是再製胎在房車的銷路一路降低。然而在大卡車及農用車輛的運用上，供仍大於求。
3. 航路：橡膠細粒能運用於瀝青路面上，有二種方法：(1)當成結成材料，舖於路面當成保護密封層(seal coat)；(2)當成結合劑，就是以細碎的橡膠粒和瀝青混合，這就是所稱的橡膠調合劑 (crumb rubber modifier, CRM)。舖設 1 英哩 2 個車道的道路密封層大約需用 1,600 個輪胎。若在 1 英哩 2 個車道上預舖 3 英吋厚的 CRM，大約需要 8,000 ~12,000 個輪胎。
4. 特殊產品：廢輪胎還可製成地板墊、暫時的路面、鞋底、釣竿握柄、排氣管襯墊和餵家畜的飼料槽。這些產品大約可佔每年 350 萬個輪胎消耗量。因為這些材質的吸震和隔音效果良好，大約有 860 萬個的廢輪胎被用來製造新的橡膠和塑膠產品。由於廢輪胎在任何氣候下都表現著高彈性、高張力的特性，所以常被運用於地板的材

質上。另外也被用於地毯墊襯、圍籬柱子、地板墊襯、高速公路的護欄、運動跑道表面、屋頂材質、鐵路平交路和車輛擋泥板。

.再生橡膠製品:在 1990 年時大約 290 萬(40%)個廢輪胎被來製造再生橡膠製品。一個輪胎大約有 40%能被再利用製成橡膠的形式。經過化學合成作用，這些橡膠能再被製成新輪胎、墊襯、黏著劑、膠帶和水管。

.熱解(pyrolysis):熱解為在缺氧的過程中進行熱分解作用。熱解廢輪胎的產物為黑碳，油和鋼鐵。黑碳被用於生產模具、鞋底、油墨和色素。油墨被用來當成汽油添加劑和燃燒爐燃料。在 1992 年大約 2 百萬的輪胎以熱解方式回收。

.填充料:輪胎碎片最適合用來當路基填充料和堆肥材料。

.再生能源:廢輪胎是一個極佳的輔助或是主要能量來源。因為每個輪胎所含的熱能約等於 2 加侖的油。在 1990 年,有 2,500 萬個廢輪胎在市場上交易量，佔全部廢輪胎的 11%。而最特出的是 TDF 的使用，佔 2,400 萬個廢輪胎。在 1993 年末期，廢輪胎的交易量增為 33%(8 千萬)為用來當 TDF<sup>(6)</sup>。

表1 廢輪胎的產生量及其去處(單位:百萬/年)

項目	EPA 廢輪胎市場研究	廢輪胎規劃委員會
全部廢輪胎	242	240
掩埋／堆置	187.8	170.4-204.0
能源利用	25.9	19.2-26.4
特殊產品	11.1	2.4-12.0
再生膠	2.9	4.8-12.0
瀝青	2.0	1.2
人造暗礁	0.3	0.2-4.8
出口	12	4.8-9.6
再製胎	33.5	12
再使用	10	0

資料來源：美國 EPA-450/3-91-024<sup>(7)</sup>

很多掩埋場拒絕廢輪胎進入場內，不只因為太佔空間的問題，也有因為健康的相關問題。例如輪胎掩埋後常會跳出覆蓋面；下雨時胎內會積水，而形成產生病媒蚊寄生的場所。雖然切碎輪胎會改善這個問題，可是太不經濟。何況胎內的鋼絲極不易切斷，所以就被堆置在旁或不合法的丟棄。這些任意堆置的廢輪胎就是病媒蟲理想的繁殖的場所，也是火災的來源，這可能是來自人為故意縱火或是天氣太熱而引起。這種火災產生大量的熱量，極不容易撲滅，甚至延續數個月。例如在維吉尼亞州溫卻斯特（Winchester, Virginia）的瑞連哈特（Rhinehart）工廠中輪胎所引的大火，持續了 9 個月<sup>(8)</sup>，也同時因燃燒而排出了大量潛在的有害物質。處理這些堆置在外的輪胎，防止火災為首要條件。因為火災持續之久，對環境的衝擊及所耗之金錢、物力之鉅，是無法估計的。而且火災導致的融膠，更會對地下水產生嚴重的危害，和引起空氣污染等問題<sup>(9)</sup>。

### 三、廢輪胎當燃料的運用

根據美國廢輪胎管理處報導，每年有一億七千五百萬個廢輪胎被運用於燃燒用途中以取得能源，其中 6,000 萬個運用於燃窯中，3,500 萬到 5,500 萬運用於製紙業中，而 4,000 萬到 6,000 萬用於發電的用途上。<sup>(10)</sup>

#### 3.1 輪胎組成

輪胎是以一種類似石油成分的產物，其組成為 88%的氫、氧、氮元素，12%為硫、鋅和稀有金屬所組成。只有 3%的輪胎成分沒有當燃料的價值<sup>(11)</sup>。輻射鋼絲(radial wire)是輪胎的基礎以增加其強度及持久性。串聯狀的高張力鋼絲(bead wire)強化了輪胎的側壁。鋼絲大約佔 10%的輪胎總重，其餘 60%為橡膠，10%為纖維。在燃燒輪胎前要先切碎至小於 0.25 英吋的尺寸，這就是所稱的 TDF，有時也稱碎片橡膠（crumb rubber）。若要用整個輪胎進行燃燒，這個廠必須時時注意突發的狀況。例如突增的高熱，而引起的爆炸，而且蒸氣中也含有大量金屬成分，這是不容忽略的空氣污染。表 2 所列為一般當成輔助燃料的廢輪胎成份組成資料一覽表<sup>(12)</sup>。

表 2 廢輪胎的組成

輪胎重量	8~100Kg(17~220 lb)
直徑	600~1,400 mm(2'~4.5')
寬度	90~450 mm(3.5'~17.5')
密度	0.15~0.5 t/m <sup>3</sup> (90~125 lb/ft <sup>3</sup> )
<b>成份</b>	<b>%</b>
天然橡膠	11
合成橡膠	21
回收橡膠	4
填充料(Soot, SiO <sub>2</sub> )	37
二氧化鋅	1.2
軟化劑(oil)	3
硫礦	1.3~2.0
其他物質	3.5
鋼絲	18
<b>氧化物成份</b>	
碳	70
氫	7
二氧化鋅	1.2
硫	1.3~2.0
三氧化二鐵	15
其他	5
<b>重金屬</b>	<b>ppm</b>
鈦	0.2
鎘	5~10
鉛	60~760
鎳	77
鉻	97
燃點	250~300°C(485~760°F)

### 3.2 廢輪胎當成燃料的優點

輪胎是一種極佳的燃料，在處理廢輪胎方面上有以下的優點：

1. 輪胎有著比碳和木頭更高的熱值。輪胎每磅大約含 15,000 Btu(大約每個輪胎含 300,000 Btu)。表 3 為比較各種不同燃料發熱值。

表 3 各種燃料熱值比較表

燃料	等級	平均熱含量
天然氣	Natural	1,000 Btu/ft <sup>3</sup>
燃料油	No. 6 Fuel Oil-“Bunker C”	151,000 Btu/gal ~17,700 Btu/lb <sup>(12)</sup>
廢油	Waste Oil	6,300 Btu/lb <sup>(7)</sup>
RuDF( Rubber Derived Fuel)	橡膠衍生燃料	16,000 Btu/lb
TDF	輪胎衍生燃料 玻璃纖維型(Fiberglass belted): 鋼絲型(Steel belted): 尼龍(Nylon): 聚脂(Polyester): 芳香聚醯胺纖維(Kevlar belted):	13,974 Btu/lb 11,478 Btu/lb 14,908 Btu/lb 14,752 Btu/lb 16,870 Btu/lb
TCF (Tire Chip Fuel)	輪胎碎片燃料	14,200 Btu/lb
Coke	石油(Petroleum)	13,700 Btu/lb
Coal	褐煤(Lignite)	7,300 Btu/lb
Coal	無煙煤(Subbituminous)	10,500 Btu/lb
Coal	煙煤(Bituminous)	12,750 Btu/lb
Wood	濕木材(Wet Wood - “Hog Fuel”)	4,375 Btu/lb

- 2.組成固定且含少量的水分。
- 3.比石油及煤炭便宜，每百萬 Btu 只要 0.18 美元。以炭為主要燃料的旋轉式流體化床，大約每百萬 Btu 要 1.5 美元。
- 4.鈷和鋅含量比炭少，其他的微量金屬元素含量和炭大約相同。硫含量也比炭和重油少<sup>(10)</sup>。由表 4 可比較各種燃料的各種成分。
- 5.燃燒完後，其所含的鋼絲可賣到回收場，以相同熱源供應為基礎來和炭比較，其燃燒完後剩下的灰量大約相同。
- 6.品質成分固定，進廠退回率低，而且材料成本低。<sup>(4)</sup>
- 7.二次產物可回收，包括溶渣(slag or bottom ash)、飛灰(fly ash)、石膏(gypsum)<sup>(5)</sup>。
- 8.增加地方稅收，減低電費開支等<sup>(9)</sup>。

表4 各種燃料的性質比較表<sup>(12)</sup>

性質	燃料	輪 胎	重 油	煤 炭
含水率%	---	---	2.6	
碳%	89.2	86.0	69.0	
氫%	7.3	11.1	4.0	
硫%	1.8	2.4	0.4	
氮%	0.2	0.3	1.3	
飛灰%	1.5	---	15.2	
卡洛里值(Kcal/Kg)	8,970	10,350	6,500	

### 3.3 廢輪胎當成燃料的缺點：

1. 把輪胎切碎成可供進料的技術性問題。
2. 在輪胎內的金屬會造成操作上的困難。例如，鋼絲必須在進入爐床之前移出，因為會卡在爐床上的鐵架，當熔化時會阻塞爐子的空氣孔。小的輻射鋼絲會累積成鳥巢狀的障礙物而阻塞在輸送帶的連接處、溶渣出口或輸出口。再者，我們必須把金屬和溶渣分離，以提高兩者的售價。另一個考慮的因素是輪胎內鋅的含量，當爐內溫度高達 2,000°F 時，鋅就會蒸發。當遇到較低溫度的灰燼和溶渣就會與其一起凝結下來，若這些灰燼和溶渣進入掩埋場，將會滲入地下水中，而引起健康問題。
3. 處理操作和電費比燃燒炭貴：處理費包括輪胎切碎機的成本和所需的能量消耗、運輸費和收集費。使用 TDF 可能遇到的商業瓶頸如表 5。
4. 環境污染問題：主要有冷卻用水、二次產物的丟棄、空氣污染、火災和病媒傳染<sup>(14)</sup>。
  - (1) 冷卻用水：此項為環境需求，不會產生水質污染，但為了經濟因素，廠方可能考慮使用地下水或是地面水，以易於取得為優先考量。
  - (2) 二次產物的丟棄：燃燒後有三種主要產物，第一種是底部灰燼，這種多孔性且重的物質，主要來自爐床的鐵架上，含有 90% 的氧化鐵，這是非毒性物質，其鐵的成分主要來自輪胎本身的鋼絲。第二種是飛灰，這種質量輕的灰燼，會隨著蒸氣而帶出爐體。廠方可以袋式集塵器，把它收集下來，並將發現它是種呈灰色的顆粒狀物，其中大約含有 40%-45% 的鋅。第三種產物為硫酸鈣(CaSO<sub>4</sub>)，主要來自空氣污染防治設備，以石灰注入中和隨熱氣體出來的硫化物而形成。

表 5 使用 TDF 可能遇到的商業瓶頸

行 業 別	瓶 頸
直接焚化廠	1. 污染設備 2. 廢氣排放無法通過目測判煙標準
發電廠	1. 回收成本慢 2. 設置和操作成本高 3. 廠址選擇問題
水泥廠	1. 操作處理費 2. 燃料成本的競爭 3. 污染防制設備處理的負荷 4. 需要重新申請排放許可
製紙和紙漿廠	1. 去除輪胎內鋼絲的費用高 2. 操作處理費 3. 燃料成本的競爭 4. 鋼絲常會阻礙進料系統 5. 懸浮微粒排放量比用平常的燃料高 6. 需要重新申請排放許可
熱解廠	1. 設置和操作成本高 2. 二次產物再純化費用高

資料來源：Franklin Associates, Ltd. and Dr. Robert L. Hershey<sup>(15)</sup>

(3)空氣污染：可能來自不完全燃燒而釋放出來。氮氧化物(NOx)和硫氧化物(SOx)會隨著不同行業和不同的污染防治設備，而有不同的濃度。例如水泥製造業，他們用輪胎和 TDF 為主要燃料，其懸浮微粒和一氧化物濃度會明顯增加，但氮氧化物和硫氧化物卻減少<sup>(15)</sup>。當燃料中 TDF 比率增多時，若防制設備採用文式洗滌器(Venturi Scrubbers)，排放的懸浮微粒會愈多，因為使用文式洗滌器時，若污染氣體內的粒子愈小時，其效率愈差。尤其是氧化鋅，由於其融點低而且粒子太小，所以易蒸發而帶出爐體。而且因為氧化鋅粒子太小而不能被文式洗滌器去除，這項因素在選擇防制設備的考慮上應特別注意。還有有機物，特別是多苯環的碳氫化合物、戴奧辛、夫喃化合物，因為他們本身毒性的本質，值得特別注意。

(4)火災：輪胎大火特別不易撲滅，而且通常會持續數個月。為了撲滅大火，而大量灌注清水，這些水會拌隨著油脂而到處漫流或滲入地下，而影響當地的水質。

(5)病媒傳染:輪胎內積蓄的水通常提供蚊子最佳的繁殖場所，所以建議處理廠若要露天放置輪胎長達 3-4 天以上，最好蓋上帆布或不透水布以防止雨水積蓄。

### 3.4 操作單元

#### 3.4.1 輪胎切碎機

美國大約有 2-3 億的廢輪胎被任意堆置。輪胎碎粒在目前的用途有舖路、運動跑道等<sup>(25)</sup>。TDF 被用於水泥窯、紙漿廠和發電廠中當成替代燃料已成現在的趨勢。由於橡膠的特性及所含的鋼絲，切割時若不使用很利的切具，很難將輪胎切至應處理的尺寸。近幾年來發展的切具都朝著高扭力、低速度，符合各式的輪胎<sup>(10)</sup>的方向進行開發。列舉以下公司所發展出來的切具：

- 1.輪胎終結公司(Terminal Tire Inc.)，維吉尼亞州<sup>(16)</sup>:這是一個為了切碎輪胎而開發出來分成 2 個切割階段的切割機器。內部主要由二個切刀所組成，配備有減速器，液體增壓器，以產生高扭力並應付任何困難的操作情況。輪胎通常都是以人工搬運至輸送帶上，所以在第一階段主要是避免輪胎卡在輸送帶上，然後帶入切刀，以 75 馬力進行切割。事實上機器常會卡住，因為當同時有二個鋼絲輪胎進入切刀時，機器就會停擺，然後輸送帶會自動往後回轉，將阻塞排除後再恢復切割。第一階段大致把輪胎切成 1 英呎大小的粒狀物再進入第二階段以 25 馬力進行切割。完成所有階段後，大約變成 2 英吋平方大小的輪胎粒。
- 2.廢棄物規劃公司 (Waste Management Inc.) ,威斯康辛州<sup>(17)</sup>:輪胎以 21.5 英呎的傾斜輸送帶運送至二個相互重疊的輪狀入口滾軸以調整進入切刀的方向和位置。這個系統以 2 個 21 英吋順時鐘轉的刀軸組成，每個刀軸有 168 個不銹鋼刀片，重疊的切割輪胎，然後進入篩選器，2 英吋以下者則由輸送帶運出切割器，大於 2”者再重入切割器內。
- 3.瑞斯切具公司 (Rex Shredder)<sup>(18)</sup>:這是一種移動性的切割器，每天能切割 5,000 到 8,000 個輪胎，只要花費美金 1,500 元。這是一個低轉速(25rpm)、高扭力的系統。設計的動機是因為高轉速需要比低轉速的機器更高的維護費。以二個順時針旋轉的刀軸組成的刀片，就像一把剪刀的功能一樣。當初設計的原理是易組易合，到處帶著走。

### 3.4.2 燃燒窯(kiln)

燃燒窯是一個圓柱狀燃燒器，設計的原理是使某一邊稍微傾斜並旋轉使進料能藉著轉動而滾動。燃燒在窯末端開始發生，所以熱氣能往上移動，加熱整個窯桶並預熱進料，主要的目的是使其水分蒸發，並開始進行可能的化學反應，而產生所稱熟料(clinker)，熟料離開窯後，和石膏混合冷卻後成為水泥(Cement)。所以在正常的操作下沒有熔渣和灰燼產生，因為所有的進料在燃燒後都變成熟料了。有一種利用整個輪胎在窯中燃燒當成能源的新技術。為了使輪胎在鍛燒區(Calcimining zone) 中完全燃燒，所以設定溫度在 2,000°F 到 2,100°F 之間，因為燃燒整個輪胎會燒得很慢，所以幾乎全部的熱能會集中在鍛燒區中，而使得效率更好。以整個輪胎來當成補充燃料有以下優點：

- 1.比燃燒煤炭更沒污染，用輪胎當燃料，減少了氮氧化物的生成。
- 2.由於熱量集中在鍛燒區，所以相對的減低在窯內其他區域的熱負荷，所以使耐火磚的壽命更長。
- 3.若將輪胎丟棄，則必須負擔清運費，可是將其當成燃料，不僅可節省燃料費，也節省了清運費。
- 4.用整個輪胎燃燒，可改善熟料的品質和冷卻性。
- 5.以 40%的替代率，每年產生了 25 萬噸的熟料，但也節省了 1 百萬的燃料費。6.燃燒後會產生三種有經濟價值的副產品（底灰，飛灰，和石膏）。底灰或熔渣由輻射輪胎中的鋼絲所構成，可被賣至水泥廠當成路面或磚瓦的生產。由袋式集塵器所收集下來的飛灰，含有高量的鋅，可被賣至金屬回收廠中。由濕式洗滌塔收集出來的石膏，被用來當成土壤改良劑和牆板工業。

### 3.4.3 燃燒器(boiler)

燃燒 TDF 的效率高低，主要受燃燒器的形狀和燃燒方法所影響。目前有幾種型式的燃燒器，例如燃燒噴霧式(pulverized)，旋風式(cyclone)，噴灑式(spreader/stoker)。目前的重點為流體化床式(fluidized bed)燃燒器。

- 1.噴霧式燃燒器：將煤炭和滑石粉均勻混合在爐內，然後以氣流帶過燃燒器而進入燃燒爐中。

2. 旋風式燃燒器：這是最為廣泛使用的燃燒器。煤炭以正切方向進入燃燒器，小的炭粒在空中就先被燒光，若有大的炭粒，就會附著於噴嘴的壁上，而導致高幅射熱、低燃燒溫度的結果。由於燃燒溫度不夠，而形成溶渣的廢棄物。若有更大的 TDF 而無法燃燒完全，就會被帶出燃燒器或者進入集塵設備，而發生阻塞(blockage)的問題。於是使用此燃燒器的先決條件是使用小顆粒的 TDF。
3. 噴灑式燃燒器：典型的噴灑式燃燒器為燃料進入一個輪狀噴射器，愈大顆粒的燃料經離心力帶動後噴在愈遠的爐床上，小顆粒的燃料於空中就燃燒完全，於是有些燃燒發生於空中（小顆粒），有的發生於爐架上(大顆粒)。為了成功運用 TDF 於噴灑式燃燒器上，應使用直徑大小大約為 2~4 英吋，稍小於炭粒或是木屑，並噴灑於主要燃料上，否則可能會阻塞噴氣孔。
4. 流體化床式燃燒器<sup>(20)</sup>：用流體化床優點為在燃燒中可允許含有高水份和飛灰的燃料，而且仍然可維持完全燃燒。再者可有效控制硫氧化物的濃度。它可被用來燃燒碎輪胎或是整個輪胎。以下就以二階段的流體化床來解釋其燃燒的過程。第一階段是將輪胎和石灰石或白雲石以螺旋狀輸入器輸入至爐內的第一階段流體化床。在此階段主要是以集中的熱量和劇烈的攪動將輪胎分解。同時由於熱解反應的發生，產生了可燃性的氣體、蒸氣、液體和固體。熱固物質、石灰石和熱金屬表面會持續的將燃燒的輪胎的尺寸變為更小的碎片。在此階段的燃燒室應該有稍微傾斜的攪拌器，使能夠將熔融狀的胎內金屬和燃燒的固體垃圾順利通過顆粒篩選器(distributor)。第一階段的熱固態物質如石灰石、飛灰隨著空氣抽至第二階段燃燒室。到了第二階段，混合物先經過旋風式分離器，將固體分離至第二階段燃燒室，而熱空氣則回到第一階段燃燒室，當成預熱空氣並增加燃燒效率。進入第二階段燃燒室，由於劇烈的攪動和持續性的燃燒，從第一階段來的揮發性物質(氣體和蒸氣)和炭粒都將被完全燃燒，此一階段最大的優點為是以更小顆粒攪動的方式而得到更好的熱量傳遞效果，但要避免過熱。

## 四、例子描述

### 4.1 能源公司

水泥・紙漿和製紙廠將廢輪胎當成燃料已經行之有年，直到最近發電廠也加入此資源再利用的行業，因為不僅可節省燃料費，也對廢棄物提供一個去處。

#### 4.1.1 奧福能源公司

##### 1. 簡介

奧福能源公司是唯一一家商業公司全部用廢輪胎當成燃料來發電的電力公司，也是第一個將此技術運用在實場操作成功的公司。每年以 490 萬的輪胎產生 1,400 萬瓦的電力。

##### 2. 操作流程

圖 1 描述奧福能源公司的操作流程

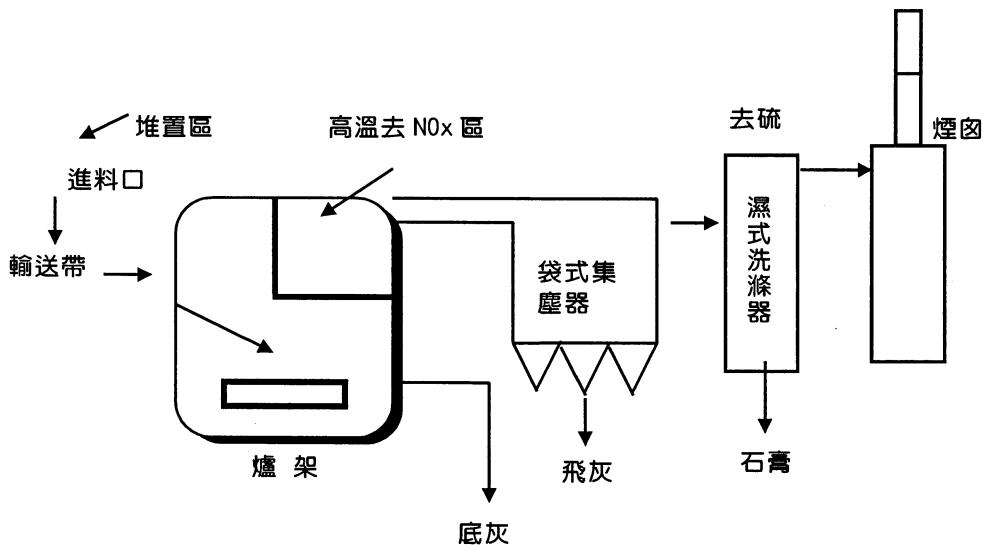


圖 1 奧福能源公司操作流程

廢輪胎被貯存於一個特殊設計靠近廠區的堆置區，運至投入口以自動運輸帶將輪胎輸入燃料室，若輪胎大於 4 英尺必須先行切碎才能進入燃燒室。其內的爐架為一種交叉往復式由數千片的不銹鋼棒所組成，以避免熔渣附著在通氣孔上。這種爐架的設計能使空氣從輪胎層中流通，以增進其燃燒效率。這些鋼棒設計成數階往下傾斜而且前往交叉移動以推動燃燒中的輪胎通過燃燒器。所有的熔渣和底灰經由這個交叉往復的爐架進入水中，經由水中輸送帶運至貯存槽，再轉售給回收商，因為熔渣含有極高的金屬成分（鋼絲），極具經濟價值。同時由於內含的鐵成分，也是水泥廠生產過程不可缺少的原料。雖然輪胎的燃點大概在  $600^{\circ}\text{F}$ ，但燃燒器的溫度設定在大於  $2,000^{\circ}\text{F}$  以確定有機成分完全燃燒後，才能排放至大氣。輪胎燃燒產生的熱氣加熱水後產生蒸氣推動渦輪發電機而產生電力。蒸氣通過渦輪發電機後以冷卻系統加以凝結再進入燃燒室中重覆使用。

為了維持電廠的操作正常，進料系統的維護是極重要的。每逢雨季，砂和泥會累積在輸送帶上，而使得輪胎滑落，於是操作系統無法控制進料量，而產生不穩定的電源。為了克服這項挑戰，當進料系統發生了問題，工廠就會用天然氣去輔助燃燒室的正常操作。

另外的問題是耐火磚的崩落，可用二種方法去解決：(1)用耐高溫的耐火磚取代傳統式的耐火磚，(2)以冷卻水壁來使熔渣冷卻而附著於耐火磚內壁而形成一層保護層。

### 3. 空氣污染防治設施

空氣污染防治措施有三個空氣污染防治程序被運用於廠中(1)最初以尿素去噴灑通過的氣體以移除氮氧化物，(2)然後將排放的氣體通過袋式集塵器移除含高量鋅的空氣微粒，再賣至處理廠回收鋅。(3)最後通過含泥狀石灰的洗滌塔移除硫化合物。

#### 4.1.2 紐約州立電力公司<sup>(21)</sup>

NYSEG 是將廢輪胎以 20:28 的比率與煤炭一起燃燒產生電力。這是紐約第一座以廢輪胎來發電的公司。該公司以 4 個燃燒器為主要的發電設備，每天以 650 噸的燃料產生 7,300 萬瓦的電力。這個替代能源為該司每個月至少節省了 16,000 噸的煤炭的花費，因為平均 20 磅的廢輪胎的熱值相當於 30 磅的煤炭錢，相對的也節省了

消費者的電費開銷。該公司的底灰被用於製成道路制滑劑，而飛灰則用於製造水泥。

輪胎屑和煤炭在進入燃燒器前先預拌好。為了確保有效率的燃燒，所以將燃燒器火焰溫度接近於 3,000°F，因為若低於 2,000°F 會產生大量的煤煙和臭味。氣體和飛灰通過複式旋風集塵器和靜電集塵器後，被收集當成水泥等的原料，而底灰累積至一定高度後，爐床自動降下，使底灰掉入水中，收集後可用於冬天時下雪的道路防滑劑。至於燃燒完後金屬所形成的熔塊，可用磁選機和底灰分離，再賣到金屬回收商。

## 4.2 水泥窯

水泥製造過程中，窯內的燃燒通常需要長時間且持續性的高溫，所以水泥業的能採用各式的燃料為其優點<sup>(12)</sup>。TDF 在水泥業中可用於當成補助燃料和預熱燃料。在德國和日本，15%~20% 的水泥工廠已將整顆廢輪胎用來取代傳統的燃料<sup>(22)</sup>。在美國 48 間水泥廠有預熱器，若那些廠以廢輪胎取代 10% 的傳統燃料，在一年內將有 4 千萬個廢輪胎消失。

在廢輪胎使用在能源的運用上，水泥窯的燃燒是最普遍的一種方式<sup>(22)</sup>。理由有以下幾點：

- 1.可提供長時間的高熱量(>2,700°F)，而且可有效的去除空氣中的有機成分。
- 2.不會降低產品的品質。
- 3.輪胎內所含的鐵和鋅成份，都是水泥製造的原料。
- 4.燃料輸入和處理方式和原來傳統方式相同，只需做稍微的修改。
- 5.水泥窯的燃料選擇的多樣性，例如煤、焦油、天然氣、和輪胎。
- 6.在正常的操作下沒有熔渣和底灰會殘存於窯內，所有的原料和燃料會結合在一起形成煤渣，然後再輾碎運用窯內燒掉。

在補充燃料的選擇需考慮到下列幾點<sup>(12)</sup>：

- (1)來源的充足
- (2)物化性質的穩定
- (3)所含熱值的高低
- (4)是否有含毒性物質
- (5)對於環境或產品品質是否有不利的影響

(6)是否比傳統燃料便宜

(7)投資成本的高低

#### 4.2.1 波特蘭水泥廠

該水泥廠的製程有以下 4 個程序

- 1.混合和輾壓：原料必須被輾碎並充分混合後再進入製程中。水泥的製造可分成濕式和乾式二種。在濕式方面，輾碎的原料和水攪拌成泥狀再送入窯內，所以就必須供給大量的燃料以蒸發泥狀混合物中所含的水份。在乾式方面，原料輾碎後就進入窯內，所以比起濕式製程需要較少的燃料。
- 2.鍛燒：水泥窯是一種大型圓柱狀，稍微傾斜並慢慢旋轉的柱狀物，其內的原料靠著重力的作用，從高端慢慢的移至低端。通常是在低端加熱，使熱空氣能順著鍛燒窯上升，而加熱原料。在原料進入鍛燒窯之前，通常必須加熱至 2,700°F。隨著原料的滾落，水份也跟著蒸發，當然化學反應也跟著發生。水解反應的消失，碳酸鎂分解成氧化鎂和二氧化碳，碳酸鈣分解成氧化鈣和二氧化碳。石灰和氧化後的黏土結合形成一種岩石狀物，稱之為熟料，離開鍛燒窯。
- 3.預料和預鍛燒器：此種系統是專為乾式流程而發展出來，使燃料更有效率的燃燒器。
- 4.水泥成品壓碎：將冷卻後的熟料壓碎，然後加大約 5%的石膏，形成水泥成品。

至於空氣污染防治措施方面，以奧瑞岡州德奇(Durkee)廠而言，該廠主要是以 9~10%TDF 和天然氣及油料混合燃燒的乾式生產過程，經過旋轉窯燃燒後，以靜電集塵器來控制空氣污染物。從表 6 可看出加了 TDF 後其空氣污染物(氯化物，鐵，微粒，二氧化硫，一氧化碳)均比以正常燃料來燃燒濃度還少。

以另一個位於華盛頓州瓦魯拉(Wallula)城市製造石灰的工廠而言，該廠以 15% TDF 加上天然氣，在旋轉窯中燃燒，並以文式洗灌器控制空氣污染物，從表 7 可看出，文式洗灌器並不能有效的減少粒小的金屬物質，例如氧化鋅，因為文式洗灌器的效率，會因粒子顆粒愈小而效率愈低。最明顯的增加為鋅，鉻，鋇等離子。

表 6 德奇廠 TDF 試燒以靜電集塵器來控制空氣污染物的排放結果

污 染 物	0%TDF	9~10%TDF	改 變 率(%)
懸浮微粒, lb/MMZBtu	0.969	0.888	-8
二氧化硫, lb/MMZBtu	0.276	0.221	-20
一氧化碳, ppm	0.049	0.036	-27
脂肪族化合物, lb/MMZBtu	0.0011	0.0009	-18
鎳, $\mu\text{g}$	30	DL	NA
鈣, $\mu\text{g}$	3.0	2.0	-33
鉻, $\mu\text{g}$	30	DL	NA
鉛, $\mu\text{g}$	DL	DL	NA
鋅, $\mu\text{g}$	35	35	0
氬, $\mu\text{g}$	0.2	0.2	0
氯, lb/hr	0.268	0.197	-26
銅, $\mu\text{g}$	37	13	-65
鐵, $\mu\text{g}$	400	200	-50

DL:低於偵測極限，NA:沒有測量值

表 7 天然氣輔以 TDF 燃燒，以文式洗滌器去除空氣污染物之效果

有 機 物	增加百分率(%)	金 屬	增加百分率(%)
蒽(Anthracene)	-51	砷	+84
菲(Phenanthrene)	-44	銅	-9
伊 Fluoranthene	+2	鐵	-27
芘 Pyrene	-6	鎳	-38
苯 (a) Benzo(a)Anthracene	0	鉻	+282
屈 Chrysene	0	鈣	-7
苯伊(b) Benzo(b)Fluoranthene	0	鉛	-31
苯伊(k) Benzo(k)Fluoranthene	+33	釤	-33
		鋇	+109
		鋅	+1,385

#### 4.2.2 藍色循環技術經驗<sup>(12)</sup>

藍色循環技術主要運用於水泥廠，以廢棄物（垃圾、TDF、燃油、煤炭）當成燃料所發展出來的技術，如圖 2。輪胎被放於水平滾軸的輸送帶，經由電梯被輸送至較高的輸送帶進入窯內。輸送帶中的重量測量器可以調整每小時進入窯中的輪胎

數量。輪胎先進入預熱區，然後進入超過  $1,000^{\circ}\text{C}$  的高溫區內。鋼絲會因此融化聚集和氧化，而變成水泥熔渣的一部份。廢氣最後再經由防制設備加以處理。

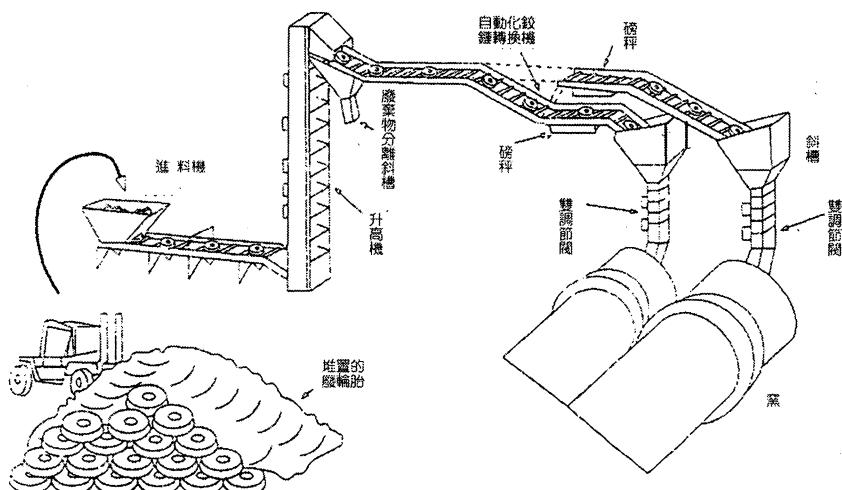


圖 2 藍色循環技術廢輪胎燃燒流程

### 4.3 製紙和紙漿廠

製紙廠以前大都以木屑為燃料來產生製程所需要的蒸氣，同時也解決廢棄物的問題。最近 15 年來，由於 TDF 穩定的熱值，低含水量和價格低廉，TDF 已經被商業化的運用在製紙業，當成輔助燃料，也改善了許多製程上的問題。因為以往的燃料雖然有高的熱值，但由於含水率的不穩定，使得燃燒時無法持續的維持爐內的溫度，而形成操作上的困難。最近製紙業基於環保上的考量，將木屑污泥、木屑和樹皮混合稱為混合燃料(hog-fuel)，當成燃燒爐的主要燃料。可是由於污泥的高含水率，使得焚化爐的操作面臨更大的挑戰。

最常用於這種混合燃料的燃燒器為噴灑型式和重疊式(overfeed stoked boiler)。噴灑式燃燒器能在高含水率的情況下燃燒燃料仍有極高的燃燒效率，而且容易操作。重疊式燃燒器比起噴灑式燃燒有較少的粒狀排放物，因為燃燒較少發生在懸浮

中進行。

斯馬菲特(Smurfit)新聞紙製廠的製造流程，以混合燃料為主要熱源，10%~15%TDF為輔助燃料。噴灑式噴嘴將樹皮噴灑在以煤炭為底的燃料之上，木屑在最上一層。TDF切碎至大約3"×2"左右，隨著空氣噴入爐內。這種以煤炭為基層燃料的處理體系，通常是先將煤炭磨碎後再輸入至各別的燃燒器內，再把樹皮、木屑、污泥和TDF由頂部放入，這樣才能有效的混合，並能容易控制進料的改變，改進燃燒效果，也能運用在不同成份比例的燃料上。廢氣經由複式旋風集塵器和洗滌塔收集飛灰。

表8列出二個廠以文式洗滌器處理TDF試燒的結果。可以明顯看出，空氣微粒和鋅含量都比沒有加TDF時增加，若是這兩廠以靜電集塵器處理，微小的金屬成份將會大幅的減少。

表8 Port Townsend 紙業和 Crown Zellerbach 公司廢輪胎試燒結果

Pollutants	Port Townsend 紙業(2/25/86)				Crown Zellerbach 公司(6/10/86)			
	木屑 +5% 燃油 1b/hr 1b*10 <sup>-4</sup> /MMBtu		木屑 + 7%TDF 1b/hr 1b*10 <sup>-4</sup> /MMBtu		木屑 +5% 燃油 1b/hr 1b*10 <sup>-4</sup> /MMBtu		木屑 + 7%TDF 1b/hr 1b*10 <sup>-4</sup> /MMBtu	
微粒	46.2		63.8		11.0		15.4	
金屬								
砷		NA		NA		3.3		6.28
鉻		257.4		350.5		11.3		29.1
鎘	0.009	42.8	0.007	31.3		2.9		5.8
鎳	0.01	54.9	0.01	34.9		0.5		3.5
銅		2,415.6		2,296.8		30.7		40.0
鐵		1,999.8		2,574.0		263.1		377.8
鉛	0.1	603.9	0.03	132.3		64.0		72.4
鎳	3.1	689.0	0.01	59.0		3.5		3.6
釩	0.2	902.9	0.001	8.9		3.0		7.5
鋅	3.1	14,790.6	48.8	249,480	0.5	2,455.0	3.1	16,381.4
PNA's								
Anthracene						1.0		0.6
Phenanthrene	0.03	9.9	0.01	26.7		45.3		16.7
Fluoranthene	0.1	419.8	0.2	772.2		37.4		14.2
Pyrene		459.4		235.6		47.8		21.7
Benzo(b)		249.5		380.2		2.3		0.0
Fluoranthene		0.6		1.2				
Benzo(k)						0.7		0.0
Fluoranthene		0.6		0.6				
Benzo(a)						0.0		0.0
Fluoranthene		1.6		2.2				
Chrysene(C <sub>16</sub> H <sub>12</sub> )						0.0		0.0
Total PNA's		3.2		2.4			0.02	
		0.3						

## 五、結論

目前美國廢輪胎最大的市場為 TDF 和壓碎成橡膠粒與瀝青混合舖路，就是所稱的瀝青替代橡膠(Crumb rubber for asphalt rubber, CRA)<sup>(26)</sup>，但是 CRA 却比傳統瀝青的價錢高 20~30%，而且 CRA 的市場已經供過於求，所以用廢輪胎當成輔助燃料的方案，將會是廢輪胎以後最大的運用途徑。

反觀台灣的廢輪胎也是一項極待解決的環保話題，而且台灣位居亞熱帶地區，病媒蚊為害健康及火災發生的潛在問題都比歐美各國更為嚴重。環境保護署及各地環境保護局正在研擬廢輪胎的最終處理方案，例如舖路和水泥廠輔助燃料等，都是歐美行之多年而且成功的廢輪胎處理方式。若政府能配合著民間企業並參考歐美的實際經驗，多方面的開發及鼓勵廢輪胎的處理方式，對台灣廢輪胎的問題一定有相當大的幫助。

## 參考文獻

1. David Tiggle, New uses for old tires, *Biocycle*, pp.40-42, 1992.
2. EPA95-05-K-001, *Scrap Tire Handbook*, October 1993.
3. U.S. Department of Energy, *Surface-Modification Technology for Scrap Tire Reuse*, September 1992.
4. John J. Lafalce, etc., *Scrap Tire Management and Recycling Opportunities: Hearing Before the Subcommittee on Environment and Labor and Subcommittee on Regulation, Business Opportunities, and Energy of the Committee on Small Business House of Representatives One Hundred First Congress*, April 18, 1990.
5. Trenton Wright, *Economic Development and Effective Resource Utilization: The Case of Sterling Tire-to-Energy Project*, *Economic Development Review*, pp.77-79, summer, 1992.
6. Michael H. Blumenthal, *Processing of Scrap Tires: Technology and Market Applications*, *National Waste Processing Conference Proceedings ASME*, pp.305-309, 1994.

## 118 美國廢輪胎回收利用方案－輪胎衍生燃料

- 7.EPA, Burning Tires for Fuel and Tire Pyrolysis: Air Implications, Dec. 1991.
- 8.Paul M. Lemieux, Jeffrey V. Tyan, Characterization of Air Pollutants Emitted from a Simulated Scrap Tire Fire, J. Air Waste Manage. Assoc., Vol. 43, pp.1106-1115, August 1993.
- 9.Michael Blumenthal, Scrap Tire Fire Prevention, Waste Age , pp.51-54, September, 1993.
- 10.Cheryl L. Robinson, Tire Shredding, Waste Age, pp.75-78, October 1991.
- 11.Michael H. Blumenthal, Processing of Scrap Tires: Technology and Market Applications, National Waste Processing Conference Proceedings ASME-Discussion, pp.65-68, 1994.
- 12.Julianne Dodds, Scrap Tire Fuel for Cement Kilns Exchange Meeting, October 2, 1984.
- 13.Lqbal F. Abdulally, Arlyn S. Libal, CFB boiler meets pollution standards, cut operating cost, Power Engineering, pp.35-37, August 1992.
- 14.Peter Geisler and H. Peter Fay, WTE Plant Strives For High Standards, World Waste, v.35, n.1, pp.28-32, Jan 01, 1992.
- 15.EPA, Scrap Tire Technology and Markets, Pollution Technology Review, No.211, 1993.
- 16.Tire Shredding Isn't That Easy, Waste Age, pp.187-188, November 1988.
- 17.Kathleen Meade, Shredding Tire Mountains, Waste Age, pp.117-120, September 1989.
- 18.“Rex” Shreds on Site, Waste Age, pp.65-68, July 1989.
- 19.Eric R. Hansen, Tire Power is Fire Power, Rock Products, pp.29-31, April 1992.
- 20.J. Y. Shang, J. S. Mei, J.E. Notestein, Fluidized-Bed Combustion of Scrap Tires, US Department of Engery Technical Note, October 1981.
- 21.Michael Blumenthal, Scrap Tire Fire Prevention, Waste Age, pp.51-54, September 1993.
- 22.Julianne Dodds, Waste Tires as Auxiliary Fuel for Cement Kilns, 1987.

- 23.Klaus S. Feindler, Waste Tire CO-Firing for Increased Winter Stream Production in Harford County Resource Recovery Facility, 1992 National Waste Processing Conference, pp.441-451.
- 24.Norman Getz, Mary Fran Teachey, Options in Scrap Tire management, Waste Age, pp.81-88, October 1992.
- 25.Cheryl L. Mcadams, An Old Tune with new Lyrics, Waste Age, pp.97-100, October 1993.
- 26.Michael Blumenthal, Scrap Tire Markets: A Status Report, Resource Recycling, pp.60-65, December 1991.
- 27.Mary Sikora, Market Development is a Key to Tire Recovery, Resource Recycling, pp.30-35, April 1994.